OCTUBRE 2008

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



COSMOLOGIA
¿Cómo nos afectaría una supertormenta solar?

SALUD PUBLICA
Contaminación del aire y trastornos genéticos

COMPUTACION
Ordenadores cuánticos de iones atrapados

MEDICINA
¿Qué causa la migraña?

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

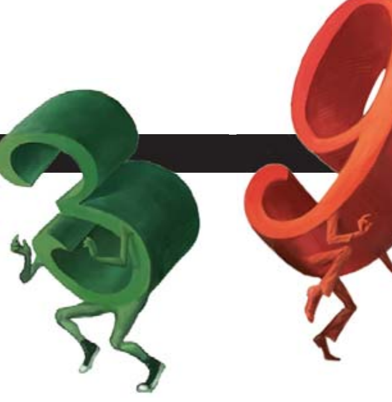
LA CRISIS DEL AGUA

Plan para evitar un drama mundial

00385
9 770210 136004

SUMARIO

Octubre de 2008/ Número 385

20

Conceptos matemáticos convertidos en juegos.

26



La carencia de agua acecha, pero hay medios para enfrentarse a ella.



38

El alcohol, la deshidratación, la menstruación y el estrés favorecen la migraña.

ARTICULOS

SALUD PUBLICA

12 Alteraciones genéticas inducidas por la contaminación

Dan Fagin

La investigación en epidemiología molecular pone de manifiesto la repercusión de la contaminación en la salud y el desarrollo de la población infantil china.

MATEMATICAS

20 Grupos simples en juego

Igor Kriz y Paul Siegel

El cubo de Rubik ha servido de inspiración para nuevos juegos. Quienes intenten resolverlos descubrirán los recovecos de cierto tipo de ente matemático: los grupos simples esporádicos.

AMBIENTE

26 La crisis del agua

Peter Rogers

La demanda de agua aumenta. Las técnicas actuales podrían impedir una crisis del agua, pero hay que aplicarlas pronto.

MEDICINA

38 Causas de la migraña

David W. Dodick y J. Jay Gargus

Los biólogos están desentrañando los misterios médicos de la migraña, desde la formación del aura hasta el dolor.

MECANICA CUANTICA

46 Computación cuántica con iones

Christopher R. Monroe y David J. Wineland

Se están dando los primeros pasos para construir computadoras de potencia gigantesca que calculen con átomos.

ALIMENTACION

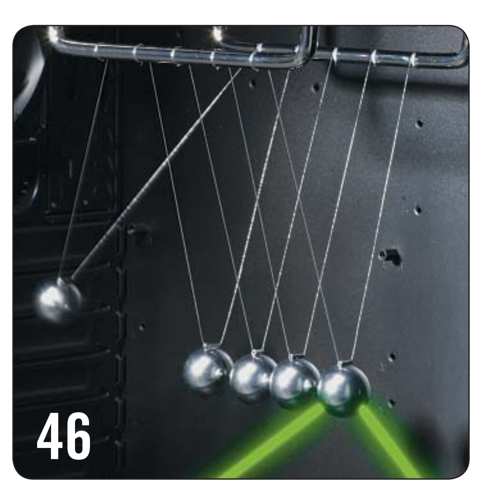
54 Potenciadores del sabor

Melinda Wenner

Compuestos que intensifican los sabores dulce y salado de los alimentos podrían ayudar a combatir la obesidad y las enfermedades cardíacas.



El 70 por ciento de la energía que consume China procede del carbón. En ese país se encuentran dos de los diez lugares más contaminados del planeta.



Avances hacia un computador cuántico.



A partir de vendajes purulentos se obtuvo por primera vez un precipitado de ADN.

GEOFISICA

58 Supertormenta solar

Sten F. Odenwald y James L. Green

La repetición de la supertormenta solar de 1859 se convertiría en un Katrina cósmico. Causaría daños en los satélites, las redes eléctricas y las comunicaciones.

FISICA

66 Plasmones superficiales

Francisco J. García Vidal y Luis Martín Moreno

Debido a su carácter bidimensional y capacidad de almacenar luz en espacios reducidos, los plasmones superficiales son firmes candidatos a desempeñar una función clave en futuros dispositivos ópticos.

HISTORIA

77 El descubrimiento del ADN

Ralf Dahm

El verdadero descubridor del ADN aisló la molécula de la vida 75 años antes de que Watson y Crick revelaran su estructura.

SECCIONES

4 HACE...
50, 100 y 150 años.

5 PUESTA AL DIA

6 APUNTES
Neuropsicología... Biología... Evolución... Pedagogía.

8 CIENCIA Y SOCIEDAD
Días soleados para el silicio... La infección, un agente selectivo... Costras microbióticas en el volcán Haleakala.

34 DE CERCA
Rojo en medio del verde, por *H. Sarmento, J. Auguet, M. Felip y J. M. Gasol*

36 PERFILES
Ian Wilmut: Células madre, por *Sally Lehrman*

86 TALLER Y LABORATORIO
Célula Couette-Taylor, por *Marc Boada Ferrer*

89 DESARROLLO SOSTENIBLE
Los Objetivos de Desarrollo del Milenio a la mitad de camino, por *Jeffrey D. Sachs*

90 JUEGOS MATEMATICOS
¿Qué es el teorema de Frege?, por *Gabriel Uzquiano*

92 IDEAS APLICADAS
Bombas de calor domésticas, por *Mark Fischetti*

94 LIBROS
Biología medieval... Filosofía... Consejo de Castilla.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Peter Brown, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
CONTRIBUTING EDITORS W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Michelle Press, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

CHAIRMAN Brian Napack
PRESIDENT Steven Yee
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
VICE PRESIDENT Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE, AND GENERAL MANAGER Michael Florek

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos
Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
MMCATALAN PUBLICIDAD
M. Mercedes Catalán Rojas
Valle del silencio, 28 4.º J
28039 Madrid
Tel. 915 759 278 – Fax 918 276 474
Móvil 649 933 834

Cataluña:
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 934 143 344
Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Bruno Moreno: *Alteraciones genéticas inducidas por la contaminación*
Luis Bou: *Grupos simples en juego*, *Potenciadores del sabor*, *Puesta al día* y *Apuntes*; Joandomènec Ros: *La crisis del agua*; Pilar García Villalba: *Perfiles*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; Juan Manuel González Mañas: *Causas de la migraña*; Ramón Pascual: *Computación cuántica con iones*; M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Supertormenta solar*; M.ª José Báguena: *El descubrimiento del ADN*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*; J. Vilardell: *Hace...*, *Ciencia y sociedad* e *Ideas aplicadas*



Portada: Cary Wolinsky

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

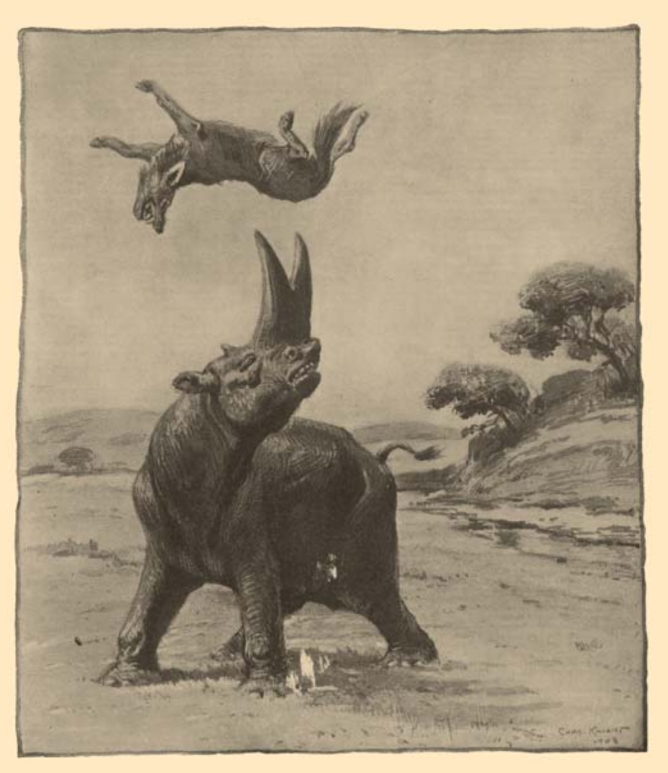
...cincuenta años

En torno a la fusión. «En la segunda conferencia sobre energía atómica, celebrada en Ginebra el mes pasado, las reacciones de fusión ocuparon el centro de la escena. Los espinosos y a menudo profundos problemas surgidos durante las investigaciones acapararon buena parte de las discusiones formales e informales. Los refinados equipos de experimentación exhibidos por el Reino Unido, EE.UU. y la URSS son testimonio de la escala ingente de los programas que las principales potencias nucleares han estado llevando a cabo, hasta hace poco en secreto. Entre las propuestas del programa norteamericano, desveladas en detalle públicamente en Ginebra, está el 'estelerador'. Se debe al Proyecto Matterhorn de la Universidad de Princeton; en él se plasman algunas de las cosas que hemos aprendido en las investigaciones realizadas desde 1951. —Lyman Spitzer, Jr.»

...cien años

Robo de coches. «Una cerradura para automóvil sencilla y a prueba de ladrones sería una invención que, precisamente ahora, resultaría atractiva para los automovilistas; sorprende que tal mecanismo no haya sido incluido ya entre la dotación normal de alguna marca de coche. Cierto es que en algunas ciudades retirar la manivela de arranque o una bujía puede constituir una protección contra el robo, pero los ladrones son muchas veces ex trabajadores de las fábricas. Ultimamente ha ocurrido varias veces que el mismo ladrón era quien había suministrado la bujía.»

Lectores botánicos. «Un suscriptor javanés de *Scientific American*, el señor Bruysman de Nongho Djadjar, junto a Lawang (Java), nos remite un interesante comunicado acerca de un jardín botánico experimental que ha fundado a 1200 metros de altitud. El clima, escribe, es ideal. Ni siquiera la estación húmeda, que dura desde noviembre hasta abril, es demasiado desagradable pese a los chaparrones diarios. El señor Brusman cultiva centenares de plantas tropicales, europeas, asiáticas, americanas y australianas, con el fin de reunir plantas medicinales, ornamentales y útiles de todos los rincones del globo. Numerosos botánicos le han auxiliado y ruega a los lectores de esta revista que le ayuden en su trabajo mediante el envío de semillas y especímenes.»



ARSINOITERIO, mamífero extinto del Eoceno, según una vívida interpretación artística de 1908

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XCIX, N.º 16, 17 DE OCTUBRE, 1908

Fósiles egipcios. «El profesor Henry F. Osborn, que dirigió la expedición del Museo Americano de Historia Natural al desierto egipcio de Fayum, muestra ahora al público uno de los más importantes y significativos de sus hallazgos en aquel lugar: el cráneo del gigantesco Arsinoiterio, uno de los mamíferos terrestres más extraordinarios del Africa prehistórica. El rasgo predominante y más poderoso del Arsinoiterio era el largo par de aguzados cuernos que sobresalían más de medio metro hacia arriba y hacia fuera, un apéndice tan fantástico como peligroso. Una recreación llena de vida y realista nos la ofrece la ilustración adjunta del señor Charles R. Knight.»

...ciento cincuenta años

Aire ácido. «Las amas de llaves nos agradecerán sin duda la información de que el negro sulfuro de plata que se forma sobre el plaqué y la plata, placas de puerta y picaportes, puede eliminarse en el acto mediante un trapo humedecido con amoniaco muy diluido. La película oscura no constituye una señal de que la plata sea impura, pues se forma sobre la plata de ley con la misma rapidez que sobre la aleada con cobre. Tras la lluvia, del suelo de nuestras ciudades se desprende gran cantidad de sulfuro de hidrógeno.»

Agricultura barata. «Parece que el 'caballo de hierro' está llamando cada vez más la atención de nuestros agricultores, para aplicarlo al cultivo del suelo. En fecha reciente, la Real Sociedad Agrícola de Inglaterra ha otorgado al señor H. Fowler el premio de 2500 dólares por el arado de vapor más eficiente. La máquina está dotada de un motor estacionario, que tira de unas cuerdas de remolque para arrastrar las rejas sobre los surcos. El señor John Joseph Mechi, el famoso agricultor inglés, utiliza uno de esos arados; su laboreo de la tierra ha mejorado muchísimo (la cosecha de trigo ha aumentado en 20 celemines por hectárea). El ahorro, respecto al uso de caballos, corresponde a un cuarto del costo total. Allá donde abunde un combustible a buen precio, seguro que dentro de veinte años el arado de vapor será de uso común en nuestras extensas praderas del Oeste.»

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Dimisión del director de Genoma

El 1 de agosto, Francis S. Collins, el rostro más conocido del Proyecto Genoma Humano, abandonó su cargo de director del Instituto Nacional de Investigación de Genoma Humano (NHGRI), tras presidirlo durante unos quince años. Al anunciar sus propósitos, Collins se mostró satisfecho por sus logros y por los de sus colegas; en especial, por el mapa del genoma humano [*véase* "El código de la vida, descifrado", por Francis S. Collins y Karin G. Jegalian, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2000]. Dejará su cargo con 58 años, pues desea libertad para escribir libros y explorar posibilidades que desbordan lo permitido a funcionarios del gobierno federal. Es posible, explica, que también haya contribuido a su decisión la ratificación la ley de "no discriminación de información genética", que le asegura que su investigación seguirá adelante, aunque no se encuentre personalmente al timón. Alan Guttmacher, director adjunto del NHGRI a lo largo de los últimos seis años, ocupa ahora el cargo de director en funciones.

—Larry Greenemeier



MISION CUMPLIDA. Francis S. Collins, que dirigió el Proyecto Genoma Humano, cede su puesto.

Pienso, luego muevo

La neuroprotesia ha avanzado otro paso más. Investigadores de la Universidad de Pittsburgh han logrado que dos monos *rhesus* se alimenten mediante brazos robóticos que controlan mentalmente. Para ello, les fue implantada en la corteza motora primaria del cerebro una matriz de 100 electrodos. La matriz recogía la actividad neuronal y la retransmitía a un ordenador, que controlaba un brazo artificial. En un 61 por ciento de las veces, los macacos lograron asir y comer mediante el brazo mecánico frutas que les fueron presentadas suspendidas ante los ojos. Ese porcentaje, aunque menor de lo esperado, resulta favorable con respecto a tentativas similares en los que monos (o humanos) han movido objetos en entornos virtuales [*véase* "Control cerebral de robots" en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 2002]. Son muchos los problemas que deben resolverse antes de que sea posible implantar en humanos extremidades controladas mentalmente. Los electrodos, por ejemplo, han de ser duraderos, y la fuerza de las prótesis ha de ser graduable con mayor precisión. El trabajo apareció en *Nature* del 29 de mayo.

—Nikhil Swaminathan



¡QUIERO COMER! Un macaco controla con su mente un brazo robótico que le alimenta.

Alcantarillado más inteligente

Se podrían interconectar ordenadores baratos, del tamaño de una uña, provistos de sensores y radiotransceptores, y crear con ellos redes inalámbricas a la medida, aptas para supervisar la vida en la naturaleza, el trabajo en fábricas y otras actividades de carácter extensivo [*véase* "Redes de sensores inteligentes para percibir el mundo real", por David E. Culler y Hans Mulder en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 2004.] En sus esfuerzos por controlar los desbordamientos provocados por las tormentas en South Bend (Indiana), ingenieros de la Universidad de Purdue, Notre Dame y la empresa local de reciente creación EmNet se disponen a obtener una red, que según ellos será la mayor de este tipo en un emplazamiento industrial y permanente. El proyecto consiste en adosar 105 sensores inteligentes a la cara interior de la tapa de los registros del alcantarillado e instalar válvulas inteligentes en las conducciones de los desagües para impedir de forma automática que se produzcan reflujos. La red, que estará lista en 2009, resultaría útil también en otras ciudades que utilicen un mismo sistema de drenaje para el alcantarillado y los desagües.

Vistas en rojo

Siguiendo las huellas y los surcos dejados por las *Viking* 1 y 2, *Mars Pathfinder*, *Spirit* y *Opportunity*, el módulo de aterrizaje de la *Mars Phoenix* se ha convertido en el sexto visitante que ha logrado posarse sobre la superficie del Planeta Rojo. Tras una maniobra en la que intervinieron paracaídas y cohetes impulsores, la nave tocó el suelo marciano el 25 de mayo.

Una de las primeras fotografías que ha enviado *Phoenix*, una vista de las llanuras del norte de Marte, presenta guijarros y formas poligonales, probablemente resultado de la expansión y contracción estacional del hielo próximo a la superficie. Curiosamente, los polígonos son mucho más pequeños (de 1,5 a 2,5 metros de diámetro) de lo que se había estimado a partir de imágenes orbitales anteriores. Ello sugiere que la dinámica de la zona puede ser más compleja de lo que se creía.

—Philip Yam



Guijarros en las llanuras marcianas.

PAUL FRANZ *AP Photo (Collins)*; MOTORLAB, ESCUELA DE MEDICINA DE LA UNIVERSIDAD DE PITTSBURGH *(mono)*; NASA/JPL-CALTECH/UNIVERSIDAD DE ARIZONA *(paisaje marciano)*

NEUROPSICOLOGIA

¿Lo toma o lo deja?

La serotonina, sustancia química cuya presencia en el cerebro afecta al humor, parece gobernar las reacciones temperamentales ante la injusticia. Unos investigadores de la Universidad de Cambridge redujeron los niveles de serotonina de un grupo de voluntarios mediante la ingestión de una combinación de aminoácidos en la que faltaba el triptófano, ingrediente indispensable para que el cuerpo elabore serotonina. Los sujetos tuvieron luego que elegir entre aceptar o rechazar una oferta: repartirse, aunque de manera desigual, una suma de dinero. El rechazo por parte de cualquiera de los voluntarios significaba que nadie percibiría dinero alguno. Los resultados demostraron que la carencia de serotonina acentuaba la tendencia al rechazo: por ejemplo, el 82 por ciento de los individuos tratados rehusaron aceptar un 20 por ciento de la bolsa, mientras que entre los sujetos con niveles normales enfrentados a la misma prueba sólo hubo un 67 por ciento de rechazo.

—Philip Yam

REPELENTES

Superiores al DEET

Los nuevos repelentes de mosquitos conservan su eficacia durante el triple de tiempo que el DEET, en la actualidad el producto más utilizado y vara de medir para la valoración de otras opciones. Al descubrimiento de los nuevos repelentes se llegó con ayuda de una red neuronal artificial, a la que se le suministraron, para su adiestramiento, las estructuras moleculares de 150 repelentes conocidos. La red neuronal examinó entonces una biblioteca de más de 2000 piperidinas, no ensayadas todavía. (Las piperidinas son compuestos afines a un agente activo de la pimienta negra que ahuyenta a los insectos.)

Con los compuestos más prometedores se impregnaron a continuación parcelas de los brazos de voluntarios humanos, que habían de mantener inmóvil el brazo durante un minuto al día en jaulas que encerraban unos 500 mosquitos. Mientras que el DEET repelió los ataques de mosquitos durante 17,5 días en promedio, algunos de los nuevos compuestos llegaron a perdurar hasta 73 días, según las observaciones de investigadores de la Universidad de Florida y del Departamento de Agricultura estadounidense.

—Charles Q. Choi





Sed de sangre: ¿Adivina en qué mano se aplicó DEET? Nuevos repelentes sin DEET pueden ser eficaces hasta tres veces más tiempo.

BIOLOGIA

La primera célula

A diferencia de las células modernas, dotadas de mitocondrias, poros, núcleos y demás equipamiento, la primera célula, que debió de aparecer sobre la Tierra hace unos 3500 millones de años, tuvo que ser muy sencilla. Probablemente no era más que una envoltura membranosa que albergaba en su interior información genética. Pero entonces, ¿cómo se alimentaba y reproducía? Investigadores de la facultad de medicina de Harvard han construido un modelo del hipotético aspecto que pudo presentar la protocélula. Valiéndose de ácidos grasos que seguramente existieron en aquella Tierra primigenia, crearon una membrana porosa que permitiera el paso de nutrientes y recia, al propio tiempo, para proteger al material genético contenido en su interior. Introducidos en un tubo de ensayo con agua, los ácidos grasos formaron un anillo en torno a una tira de ADN. Añadieron también nucleótidos —unidades de material genético—, que penetraron en la célula, se anclaron en el ADN y lo copiaron durante 24 horas. Todavía no se sabe cómo pueden separarse los filamentos de ADN originales y copiarse, paso imprescindible para que la célula se divida y reproduzca.

—Nikhil Swaminathan

OFTALMOLOGIA

Córneas artificiales a la vista

Las lesiones en la córnea, la segunda causa de ceguera, las sufren 10 millones de personas en el mundo. Los trasplantes de córnea, sin embargo, son a menudo inviables, por escasez de donantes o barreras culturales. Según los investigadores de la Universidad de Stanford, las córneas artificiales basadas en materiales avanzados podrían en breve suprimir la necesidad de donaciones. De manera similar a las lentillas blandas, las córneas artificiales más modernas están formadas por geles hidratados que emulan las propiedades de las córneas reales; entre ellas, la de permitir la difusión de nutrientes.

—Charles Q. Choi

Erratum corrige

En el artículo "El dilema del dopaje", publicado en el número de agosto de 2008, en la gráfica de velocidades medias en el Tour de Francia (página 79) aparecen los valores del eje de ordenadas en millas por hora; deberían convertirse en kilómetros por hora: 34, 37 y 40.

GREGORY ALLEN *USDA, ARS Mosquito and Fly Research Unit,* GAINESVILLE, FLA. *(repelentes);* WILLIAM WHITEHURST *Corbis (ojos)*

ASTRONOMIA

Captar una explosión estelar

Se detectó una estrella con un brote de radiación en la región ultravioleta del espectro. Tras varias horas, estalló. Lo que se había estado observando era el más temprano aviso visible de una supernova inminente. El brote de rayos ultravioleta es el resultado de la oleada térmica que se produce cuando una onda de choque interna expansiva pugna por liberarse de la estrella. Esa señal es la última oportunidad de recoger datos sobre la estrella aún intacta, justo antes de su destrucción. Este descubrimiento viene muy poco después de que se hayan detectado los rayos X que se generan cuando la onda de choque destroza la estrella.

—J. R. Minkel

EVOLUCION

Monogamia y la abeja reina

Perdura desde hace mucho años el debate entre los biólogos sobre la evolución de los insectos eusociales, con sus sociedades cooperativas de reinas, obreras y zánganos. Por un lado, la teoría de la "selección por parentesco" sostiene que los miembros que no se reproducen entregan sus genes para ayudar a que sus familiares se reproduzcan. Los miembros de una colonia deben estar, pues, estrechamente emparentados. Sin embargo, biólogos del prestigio de Edward O. Wilson, de la Universidad de Harvard, afirman que los insectos eusociales colaboran en colonias porque les confiere una ventaja individual; su ánimo cooperador no es más que una consecuencia. Si el índice de parentesco es alto en la colonia, ello se debe a que los individuos eligen unirse para recoger los beneficios de una vida en grupo.

Un equipo de investigadores, dirigido por William Hughes, de la Universidad de Leeds, presenta pruebas en favor de la selección por parentesco en la eusocialidad; no habría aquí selección de grupo. Examinaron el árbol evolutivo de 267 especies de abejas, avispas y hormigas, y encontraron que esas especies habían evolucionado a partir de condiciones monógamas, que elevan al máximo los parentescos dentro del grupo. Comprobaron, además, que la poliandria (que las hembras se apareen con más, a veces mucho más, de dos individuos) solamente aparece en los linajes donde las obreras han devenido permanentemente estériles, como predice la teoría de selección por parentesco para especies que se han convertido en eusociales de modo irrevocable. Según Andrew Bourke, de la Universidad de East Anglia, el estudio señala la selección por parentesco como condición previa esencial de la eusocialidad.



La eusociabilidad de las abejas y otros insectos evolucionó desde una monogamia ancestral.

Wilson disiente, sin embargo, asegurando que el trabajo de Hughes no incluye datos sobre numerosos linajes que no desarrollaron eusocialidad y que la aparición de poliandria en colectividades eusociales puede explicarse sin recurrir a la selección por parentesco.

—Keren Blankfeld Schultz

PEDAGOGIA

Aprendizaje matemático concreto

Los ejemplos abstractos son más eficaces que los problemas prácticos a la hora de enseñar conceptos matemáticos. Unos investigadores de la Universidad estatal de Ohio enseñaron a un grupo de estudiantes un nuevo sistema matemático mediante símbolos: círculos y diamantes. A otro grupo se lo enseñaron mediante escenificaciones, como la combinación de líquidos en recipientes graduados. Los estudiantes que aprendieron con símbolos consiguieron un 80 por ciento de aciertos en un examen que requería que aplicasen sus conocimientos en una nueva situación, mientras que los demás sólo obtuvieron entre un 40 y un 50 por ciento de aciertos.

—Nikhil Swaminathan

MATERIALES

Papel tenaz como el hierro

Un nuevo tipo de papel resiste el desgarro mejor que el hierro colado. Los materiales constituidos por fibras de celulosa se rasgan fácilmente por tracción. Ahora, en la Regia Institución de Tecnología de Estocolmo, se ha diseñado un "nanopapel" que resiste la fractura. En la preparación de estas hojas, la pulpa de madera fue tratada con enzimas y después pulverizada. Las fibras de celulosa que componen el papel acostumbran alcanzar un grosor de algunas decenas de micras, pero en el nanopapel las fibras que se enredan y entremezclan tienen entre 10 y 40 nanómetros de anchura. Es probable que su elevada resistencia tensil sea consecuencia de su estructura en tela de araña y de la forma en que estas fibras se adhieren unas a otras.

—Charles J. Choi

HANS REINHARD *zefa/Corbis*

Días soleados para el silicio

Pequeños avances hacia una energía solar tan barata como la energía del carbón

El viejo dicho de que "lo peor son los detalles" caracteriza la clase de fastidiosos obstáculos que impiden que una idea innovadora se convierta en una técnica aplicable. Describe también los problemas que deben solventarse para recortar los costes del producto final y hacerlo comercialmente asequible.

Emanuel Sachs, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, lleva toda su carrera pugnando con un sinnúmero de tales pegas en su empeño por desarrollar unas células solares baratas y de alto rendimiento. Está descubriendo procedimientos que han ido incrementando la cantidad de electricidad que generan las células fotovoltaicas (FV) comunes a partir de la luz solar sin que lo haga su coste. Concretamente, ha elevado el rendimiento de conversión de células experimentales de silicio policristalino desde el típico 15,5 por ciento hasta casi un 20 por ciento, el mismo que el de las células de silicio monocristalino, más caras. Estas mejoras podrían acercar el coste de la energía de las células al euro por watt. Con pequeños retoques, Sachs espera crear antes de dos años células solares capaces de producir corriente incluso a un dólar por watt; así, la electricidad solar sería tan competitiva como la de las centrales térmicas de carbón.

La mayoría de las células solares, como las de los tejados domésticos, emplean silicio para convertir luz solar en corriente eléctrica. Unas conexiones metálicas extraen luego la electricidad del silicio para accionar electrodomésticos o alimentar una red eléctrica.

Desde que las células solares empezaron a ser utilizables y asequibles, hará unos treinta años, se ha preferido el silicio monocristalino como sustancia activa, dice Michael Rogol, director gerente de Photon Consulting, empresa radicada en Alemania. Lo habitual es serrar obleas de un lingote formado por un cristal único que se ha extraído por estiramiento de una cubeta de silicio fundido. Sobre todo al comienzo, aquellos lingotes, de gran pureza, eran sobrantes del proceso de manufactura de circuitos integrados, pero posteriormente el proceso entero se realizaba ya para la construcción de las células. Las células de monocristal, aunque ofrecen un rendimiento de conversión alto, son de fabricación cara. Las de silicio policristalino, que las fábricas obtienen a partir de lingotes colados de menor pureza y compuestos de un gran número de pequeños cristales, son de fabricación más barata, pero rinden menos que las células monocristalinas.

Sachs, que ha sido el primero en utilizar diversos procedimientos novedosos para conseguir unas células solares más baratas y eficientes, ha centrado ahora su atención en los detalles de la fabricación de las células de silicio policristalino. El pequeño primer avance atañe a "los diminutos contactos que recogen la electricidad en la superficie de la masa de silicio", aclara. En los procesos ordinarios de fabricación de células, para crear esos filamentos se recurre al estarcido ("como en las serigrafías de precisión de las camisetas", explica) con tintas que contienen partículas de plata. El inconveniente es que los conductores de plata acostumbrados salen anchos, cortos y con muchas inclusiones de huecos vacíos. En consecuencia, bloquean una buena porción de luz solar y no transportan toda la corriente que deberían.

En 1366 Technologies, la empresa que ha fundado hace poco —el número se refiere al flujo de luz solar que incide en la atmósfera exterior de la Tierra, 1366 watt por metro cuadrado—, Sachs emplea "un proceso por vía húmeda patentado que produce filamentos más estrechos y más largos", de 20 por 20 micras. Estos filamentos más delgados gastan menos cantidad de una plata costosa y se pueden instalar más juntos, de suerte que extraigan más corriente de la vecina sustancia activa, por la que los electrones no pueden desplazarse mucho más lejos. A la vez, los filamentos bloquean menos luz incidente que los instalados en los dispositivos actuales.

La segunda innovación consiste en modificar los filamentos de interconexión anchos y planos que recogen las corrientes de los colectores de plata y conectan eléctricamente las células contiguas. Los filamentos de conexión de la cara superior pueden tapar hasta un 5 por ciento de la superficie de la célula. "En las caras de esos conductores arrollados colocamos superficies especulares con textura. Esos pequeños espejos reflejan la luz incidente con un ángulo bajo —unos 30 grados—; así, cuando los rayos reflejados chocan con la capa de vidrio de la parte superior, la reflexión total impide que salgan de la oblea de silicio. (Es este un efecto óptico que comúnmente ven los buzos y los buceadores cuando observan la superficie del agua desde abajo.) Cuanta más luz se quede dentro, mayor



Energía solar sobre el granero: El empleo de paneles solares fotovoltaicos, como los de este granero, se irá generalizando conforme diseños más ingeniosos consigan que las células de silicio policristalino —las más corrientes— resulten más competitivas.

posibilidad habrá de que sea absorbida y transformada en electricidad.

Espera Sachs que con nuevos revestimientos antirreflexivos aumente el rendimiento de las células policristalinas. Uno de los objetivos futuros de su empresa es sustituir los caros filamentos de plata por otros más baratos de cobre. Tiene ya algunas ideas acerca de cómo llevar a cabo esa sustitución. "A diferencia de la plata, el cobre rebaja por contaminación las prestaciones de las células fotovoltaicas de silicio", dice Sachs, "por lo que será crucial colocar una barrera barata antidifusión que impida el contacto directo entre el cobre y el silicio". En este trabajo, siempre hay que considerar esos pequeños y molestos detalles.

Steven Ashley

La infección, un agente selectivo

La resistencia frente a la infección por microorganismos patógenos es un factor importante en la evolución de los Metazoos

Una de las causas más importantes de mortandad de los organismos multicelulares, especie humana incluida, es la infección. La interacción entre un patógeno y su huésped puede considerarse una relación clásica depredador-presa, en la cual el agente infeccioso intenta aprovechar los recursos nutricionales que le ofrece el huésped. Como dice Bruce Levin, para los organismos infecciosos no somos (nosotros, y por extensión otros organismos multicelulares) más que una especie de frasco de cultivo repleto de nutrientes. Es lógico, por tanto, que los organismos multicelulares hayan desarrollado a lo largo de su evolución medios para defenderse de la agresión de los patógenos. Sin esa persistente presión selectiva, no se entiende el desarrollo de sistemas tan complejos como la respuesta inmunitaria o la reacción de las plantas frente a la infección.

Micrografía electrónica coloreada artificialmente de *Caenorhabditis elegans*. En el círculo se amplía una zona de piel de este nemátodo en la que se pueden observar bacterias adheridas.

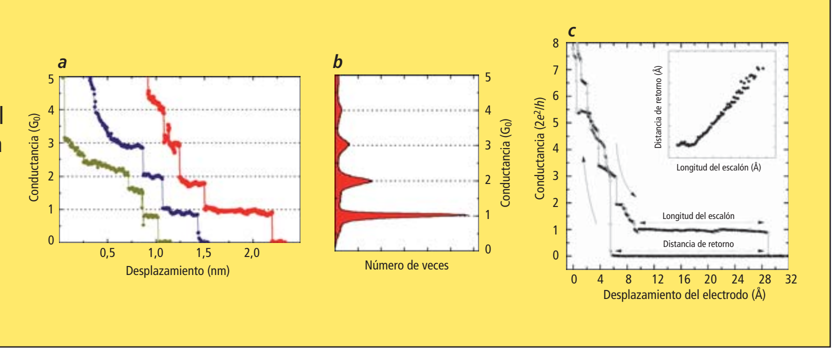
En contrapartida, los organismos patógenos han desarrollado, a su vez, sistemas para evadir la acción defensiva de sus potenciales presas. Vemos, pues, que la infección, al igual que cualquier otro sistema presa-depredador, hace que tanto el organismo infectado como el infeccioso evolucionen de modo concertado, siguiendo un modelo al que se ha denominado "de Reina Roja", en referencia al pasaje de *Alicia en el país de las Maravillas* donde se dice que hay que correr constantemente para permanecer en el mismo lugar.

La infección constituye un motor evolutivo importante en otro sentido: como consecuencia de mecanismos de selección de segundo orden. Esa idea fue propuesta por John Burdon Sanderson Haldane en 1932, en el curso de su investigación sobre la prevalencia de ciertas enfermedades hereditarias, por ejemplo la anemia falciforme. Haldane observó que la incidencia de la enfermedad era más alta de lo que cabía prever, a partir de consideraciones genéticas, en poblaciones de la zona mediterránea. Al tratarse de una patología, no puede haber una selección positiva de los individuos aquejados; por tanto, tiene que haber otro elemento de selección independiente de la enfermedad. De ahí la expresión "selección de segundo orden".

La zona del Mediterráneo era en aquellas fechas una región con una alta incidencia de la malaria. Haldane planteó que el defecto genético que producía la anemia falciforme también protegía frente a la infección por *Plasmodium falciparium*, el agente causal de la malaria. La investigación posterior demostró que, en efecto, los individuos aquejados de anemia falciforme (y heterocigotos en el gen causante de la enfermedad, es decir, que cuen-

Erratum corrige

En la nota "Cadenas atómicas zigzagueantes", publicada en el número de septiembre de 2008, se han omitido las gráficas a las que se hace referencia en el texto como figuras 2a, b y c. Por tanto la referencia a la figura 3 es, en realidad, a la figura 2. En la misma nota, en el penúltimo párrafo, donde dice: "Ambas cosas ocurren en los experimentos, siendo la segunda bastante más común que la primera." debe decir: "Ambas cosas ocurren en los experimentos, siendo la primera bastante más común que la segunda."



tan con la variante ordinaria del gen y la asociada a la enfermedad) son más resistentes a la infección por *P. falciparium*.

Otro ejemplo de esta situación podría ser la fibrosis quística, la enfermedad hereditaria con mayor incidencia en individuos caucásicos (1 de cada 3000). Se produce como consecuencia de alteraciones en un canal de cloro; quienes la sufren tienen infecciones pulmonares recurrentes con desenlace fatal. Se ha visto que este canal de cloro es el receptor celular de ciertos patógenos. De ahí que se haya sugerido que la resistencia a la infección por los patógenos en cuestión es lo que provoca la alta incidencia de la fibrosis quística. La infección podría, pues, constituir un agente selectivo de segundo orden que esté alterando la prevalencia de algunos poliformismos genéticos en los organismos multicelulares. En ese sentido, se ha pensado que la causa de una incidencia superior a lo esperable de una enfermedad hereditaria estribará en que los individuos portadores del defecto genético (o los heterocigotos) sean menos susceptibles a algún tipo de infección.

Como ocurre en todas las leyes evolutivas de los organismos pluricelulares, y más específicamente con las de los Metazoos, estas deducciones se basan en correlaciones, no en experimentos de laboratorio. Por una razón: los tiempos en los que opera la evolución son mucho más largos de lo que puede abordarse en un estudio experimental.

Sin embargo, nuestro laboratorio ha logrado validar en el laboratorio la ley de Haldane sobre el papel de la infección como agente selector en la evolución de los Metazoos. Para ello, hemos utilizado un modelo animal sencillo, el nemátodo *Caenorhabditis elegans*. Este organismo muere como consecuencia de la infección por la bacteria *Pseudomonas aeruginosa*. Bajo esta presión selectiva letal, ha aparecido un nemátodo mutante que resiste a la infección por *P. aeruginosa*. La variante evolucionada presenta defectos en respiración; podría, pues, decirse que ha desarrollado una enfermedad hereditaria como consecuencia de una selección de segundo orden debida a la infección por *P. aeruginosa*. Nuestros resultados validan de un modo experimental la hipótesis de Haldane sobre el papel fundamental de la infección en la evolución de los Metazoos.

Alfonso Navas
Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC) Madrid

José Luis Martínez
Centro Nacional de Biotecnología (CSIC) Madrid

Costras microbióticas en el volcán Haleakala

El musgo tapiza el cráter y modifica las propiedades de su suelo

Las costras microbióticas son estructuras epiedáficas y formadas por pequeñas plantas y microorganismos. Comunes en la superficie de los suelos de los desiertos, se las ha estudiado poco en las montañas. Vale la pena, pues, dar a conocer los resultados de una investigación de costras microbióticas situadas a 2340 m de altitud, en concreto las que tapizan los suelos de piroclastos —materiales expelidos en las erupciones— del volcán Haleakala, en la isla hawaiana de Maui.

La cima de Haleakala consiste en una inmensa depresión o cráter, con varios conos de cenizas. Es un desierto tropical alpino, que se encuentra a unos 21º latitud N. Recibe sólo de 130 a 500 milímetros (de 130 a 500 litros por metro cuadrado) de lluvia al año. La vegetación vascular, aunque escasa en el cráter, incluye gramíneas, arbustos y la espada de plata, una planta arrosetada endémica de las islas hawaianas.

Las costras de Haleakala contienen casi exclusivamente el musgo *Grimmia torquata*, que crece también adherido a rocas junto a *Grimmia trichophylla*. El hielo acicular, la lluvia intensa o la desecación extrema desprenden a veces, de los sustratos rocosos, fragmentos de estos musgos y del liquen *Peltigera rufescens*. Sueltas, las criptógamas son transportadas por agua, viento y gravedad a nuevos sitios, donde colonizan rocas o suelos. En los Andes de Venezuela, el musgo *Grimmia*



1. Vista del cráter Haleakala, a unos 2340 metros de altura, en agosto de 2002. Esta planicie central se halla cubierta por extensas capas de cenizas y arenas gruesas, con bombas volcánicas aisladas. Carece de vegetación. Al fondo se ve Pu'u o Maui, un gigantesco cono piroclástico (formación Hana, de 3000 a 5000 años de antigüedad); su cima llega a los 2479 m.

longirostris también produce similares formas errantes y costras de suelo.

En Maui los musgos crean una fina capa superficial, de 15 a 25 mm, casi continua sobre el suelo, con focos de crecimiento concentrado en forma de pequeños montículos de 20 a 45 mm de alto. Las microdepresiones entre montículos colectan partículas más gruesas (grava y arenilla), que se van acumulando debido al congelamiento nocturno del suelo u otros procesos pedológicos. Como en otros lugares, las costras de musgos ejercen una influencia notable en el sustrato. Para determinar estos efectos, se compararon 10 pares de muestras superficiales (de 0 a –5 cm) en áreas con costras y en los suelos yermos contiguos.

El crecimiento paulatino de los briófitos —el musgo— aumenta la materia orgánica edáfica más de 3 veces, de 2,1 % en el suelo desnudo a 6,7 % en los montículos. La acumulación de residuos orgánicos bajo las costras va acompañada de un reciclaje y concentración de nutrientes que enriquece el suelo. Los elementos químicos muestran un nivel más elevado debajo de los musgos que en suelos desnudos. El nitrógeno incrementó casi 3 veces, de 11 a 31 partes por millón, mientras que la concentración de calcio, magnesio, potasio y fósforo se duplicó. Algunos organismos microscópicos, algas o cianobacterias (que ayudan a fijar el nitrógeno atmosférico), podrían hallarse en las costras. En suma, los suelos asociados con las costras son más fértiles que los suelos adyacentes que carecen de briófitos.



2. Area de costras microbióticas en el cráter Haleakala. Los suelos con costras de musgos se evidencian por su color marrón amarillento; las áreas circundantes están recubiertas por una fina capa de gravas volcánicas negras. La vegetación vascular asociada con las costras consta principalmente de gramíneas (*Deschampsia nubigena*, *Trisetum glomeratum*) y rosetas de espada de plata hawaiana (*Argyroxiphium sandwicense*); la roseta del centro tiene una inflorescencia de unos 125 cm de altura.

Los musgos alteran gradualmente la textura edáfica. El suelo subyacente bajo las costras muestra un mayor porcentaje de partículas finas que el suelo sin criptógamas; el contenido de limo y arcilla es de alrededor de un 70 % en las zonas musgosas, frente a un escaso 13 % en las parcelas desnudas circundantes. Asimismo, el porcentaje de grava en estos suelos decuplica, y el de arenilla duplica, el hallado bajo las costras. Unas diferencias estadísticamente significativas.

La disparidad de texturas se debe a que los musgos captan selectivamente material fino, transportado por el viento o por aguas de escorrentía. La comparación de porcentajes reveló que la cantidad de partículas finas en los musgos aumentaba de forma abrupta por debajo de las 500 micras: un 91 % de los granos de suelo en las costras miden hasta 500 micras de diámetro, mientras que los suelos baldíos sólo contienen alrededor de un 25 % de granos en esa fracción. Observada al microscopio, la apertura promedio entre tallos y hojas en la superficie del musgo es de 350 a 500 micras. Sólo los granos menores pueden introducirse en los briófitos e incorporarse a ellos.

La acumulación de material orgánico y granos finos hace que el suelo en las costras pueda almacenar cinco veces más agua (alrededor de un 82 %) cuando está saturado que el suelo desprovisto de musgo, que se queda en un 16,5 %. La temperatura máxima del suelo a una profundidad de 5 centímetros en días soleados y cerca del mediodía es menor bajo las costras, con un promedio de 26,6 °C en los días en que la medimos, que en suelo cubierto por grava negra, donde llega casi a los 40 grados. Esto sucede por las diferencias de albedo entre los musgos, de color claro y con superficie rugosa, y el sustrato colindante, mucho más oscuro. Los contrastes térmicos producen una alta evaporación en el suelo sin musgos,



3. Pequeños montículos cubiertos por musgos. En la parte inferior derecha se distinguen varias estructuras edáficas alargadas; las microdepresiones entre montículos están ocupadas por gravas volcánicas oscuras. La foto abarca unos 200 cm de anchura.

lo que agrava la escasez de agua, ya extrema, de estas zonas.

Como es lógico, las modificaciones del suelo asociadas al musgo resultan beneficiosas para el crecimiento de las plantas vasculares, que colonizan con preferencia las áreas con musgos y faltan en los inhóspitos suelos aledaños, que no aportan suficientes nutrientes o humedad para sobrevivir a la intensa sequía periódica que caracteriza a la zona. De ahí que las parcelas con costras incluyan hasta 13 especies de plantas vasculares.

La intrincada y densa maraña formada por los tallos, hojas y rizoides de los musgos ejerce importantes efectos geomorfológicos. Esas estructuras botánicas incrementan la agregación y cohesión del suelo. Las mediciones de resistencia a la torsión lateral y la compresión vertical nos enseñan que los suelos protegidos por musgos oponen una resistencia a estas fuerzas 3 y 6 veces mayor, respectivamente, que los suelos sin costra. De tal observación se infiere que los musgos resisten el desprendimiento por impacto de gotas de lluvia y la erosión eólica o por agua corriente mucho mejor que los suelos sin briófitos.

En resumen, las costras de musgos no sólo mejoran notablemente los suelos volcánicos del cráter, sino que ayudan también a conservarlos y a que otras plantas proliferen.

Francisco L. Pérez Sánchez
Depto. Geografía y del Medio Ambiente
Universidad de Texas en Austin

Alteraciones genéticas inducidas por la contaminación

La investigación en epidemiología molecular pone de manifiesto la repercusión de la contaminación en la salud y el desarrollo de la población infantil china

Dan Fagin

CONCEPTOS BASICOS

- La epidemiología molecular busca correlaciones entre factores ambientales y alteraciones génicas que contribuyen a la aparición de enfermedades.
- Algunos biólogos cuestionan este enfoque porque apenas se conocen biomarcadores de susceptibilidad, exposición o enfermedades precoces que permitan predecir patologías futuras.
- Existe un buen caso de estudio para la epidemiología molecular ambiental: una ciudad china cuya central eléctrica de combustión de carbón se cerró en 2004.
- Los niños nacidos en 2002, cuando la central estaba aún en funcionamiento, tienen la cabeza más pequeña y obtienen puntuaciones inferiores en las pruebas de desarrollo que los nacidos un año después del cierre de la central. Los primeros presentan niveles superiores de alteraciones génicas relacionadas con la contaminación.

Pilas de chatarra amontonadas y un oxidado cobertizo de carbón es todo lo que queda de la central eléctrica que, hasta hace poco, se aposentaba, como un inmenso dragón con las fauces llenas de humo, en Tongliang, una ciudad gris de cien mil habitantes, en la parte meridional del centro de China. Mientras caminamos hacia el cobertizo, un pastor belga comienza a ladrar furiosamente; tira de su cadena de hierro y muestra unos dientes afilados. Un rostro de ojos oscuros me mira desde el umbral de una puerta abierta. Es una niña, vestida con una blusa manchada; al ver que nos acercamos, el gatito rayado que sostiene salta para esconderse debajo de un bloque de cemento. La niña no tendrá más de seis o siete años; parece que vive en el cobertizo con su padre, que nos observa con recelo desde el interior.

La delegación de funcionarios locales que nos guían en la visita a las instalaciones se sienten avergonzados. Intentan conducirnos rápidamente hacia una oficina cercana, para mostrarnos la maqueta de un extravagante (para lo habitual en Tongliang) proyecto inmobiliario de 900 viviendas, que se proyecta construir en ese terreno. Pero Frederica Perera siente curiosidad. Se acerca a la niña y le sonríe, mientras saluda con un amistoso “ni hao”. La niña le devuelve la sonrisa y regresa a las sombras con su padre.

Después de todo, los niños son la razón por la que Perera, directora del Centro para la Salud Ambiental Infantil de la Universidad de Columbia, se halla aquí. Está buscando una conexión entre la contaminación atmosférica y las enfermedades, sobre todo en niños que fueron expuestos a contaminantes cuando se encontraban aún en el seno materno. Perera es una de las impulsoras de la epidemiología molecular, la ciencia que aplica las herramientas del análisis molecular a la identificación de factores genéticos y ambientales que contribuyen a la aparición de enfermedades. Ella y otros epidemiólogos moleculares realizan una parte cada vez mayor de su trabajo en los países en

1. AIRE CONTAMINADO. Un niño lleva máscara para evitar la contaminación en Linfen, China. Los resultados preliminares de un estudio realizado en la ciudad china de Tongliang revelan que los niños expuestos a una atmósfera altamente contaminada cuando estaban todavía en el seno materno presentan mayor número de cambios en su ADN (y, por tanto, un riesgo superior de sufrir trastornos del desarrollo) que los niños cuya madre respiró un aire más limpio durante el embarazo.

vías de desarrollo, donde la contaminación se halla tan extendida, que sus complejas relaciones con la salud pueden calibrarse incluso en poblaciones reducidas. Pero sus conclusiones deberían aplicarse también a lugares como los EE.UU., Europa o Japón, donde la exposición ambiental es más sutil y sus efectos más difíciles de medir en estudios a pequeña escala.

Dondequiera que trabajen, lo que distingue el enfoque de los epidemiólogos moleculares es la búsqueda de bioindicadores que guarden una estrecha relación con la exposición a productos tóxicos y con las enfermedades. A menudo, los marcadores toman la forma de sustancias unidas al ADN o de alteraciones génicas (estructurales o funcionales) que concuerdan con tipos particulares de contaminantes y de enfermedades. Ahora que las micromatrices de ADN y otras técnicas analíticas facilitan la medición de varios de esos biomarcadores, el uso de tales herramientas podría salvar vidas, mediante la identificación de poblaciones de riesgo con respecto a contaminantes específicos.

Sin embargo, ese enfoque no está exento de polémica, pues por ahora se conocen pocos biomarcadores moleculares de exposición o de síntomas tempranos (elementos que anuncian la llegada de enfermedades). Además, resulta muy difícil eliminar el efecto de las variables de confusión (dieta, predisposición genética, etcétera), factores que pueden ser de no menor importancia que el contacto con sustancias contaminantes para la aparición de diversas enfermedades. Descubrir el modo en que la interacción de esos factores de riesgo puede afectar la salud entraña todavía mayor dificultad.

Por todo ello, transcurrido un cuarto de siglo largo desde que Perera terminase su primer estudio sobre el tema, la epidemiología molecular ha progresado con mayor lentitud de lo que esperaban sus arquitectos. La mayoría de los investigadores parece estar de acuerdo en que, por muy atractiva que resulte la disciplina, la complejidad del mundo real limita su utilidad. El entusiasmo inicial que produjo la idea de que los cambios en ciertos biomarcadores (la proteína p53, por ejemplo, que evita la aparición de tumores) podrían constituir indicadores fiables y precoces del desarrollo de enfermedades se ha ido desvaneciendo conforme se han identificado etiologías complejas, que implican cascadas de cambios bioquímicos, para numerosas enfermedades. La idea de aplicar biomarcadores para una detección precoz y un tratamiento personalizado no es tan sencilla como parecía en un principio.

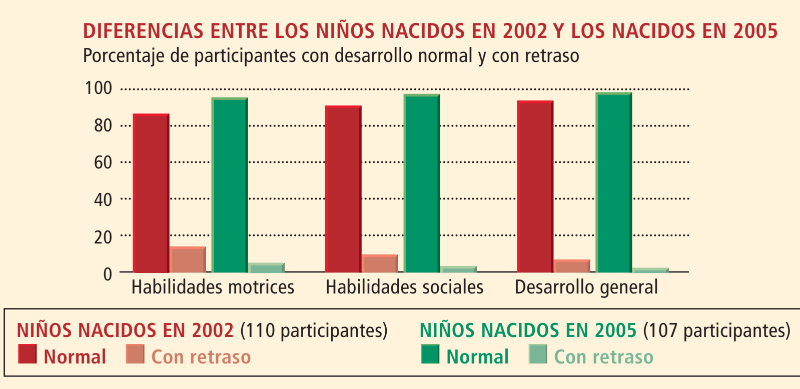
En Tongliang, sin embargo, Perera ha encontrado un caso que demuestra la eficacia de la epidemiología molecular ambiental. Ella y su colaborador de Columbia, Deliang Tang, están obteniendo resultados que confirman el optimismo inicial. La forma en que han realizado sus investigaciones resulta casi tan interesante como lo que han descubierto.



RETRASOS DEL DESARROLLO



Los niños de Tongliang nacidos en 2002, cuando la central eléctrica local de combustión de carbón estaba aún en funcionamiento, obtuvieron peores puntuaciones en las pruebas de habilidades motoras y sociales que los nacidos en 2005, un año después del cierre de la central. Se consideraban "retrasados" los niños que obtenían puntuaciones por debajo de 85 en una evaluación estándar (prueba Gesell). Los niños nacidos en 2002 presentaban en sus leucocitos concentraciones superiores de aductos de HAP-ADN (alteraciones del ADN provocadas por la exposición al aire contaminado con hidrocarburos aromáticos policíclicos o HAP). Entre los niños nacidos en 2002, el nivel de aductos mostraba una estrecha relación con el retraso en el desarrollo.



MELISSA THOMAS (*gráfica*); DAN FAGIN (*fotografía*)

Los niños de ciudades donde el aire era más limpio presentaban niveles de aductos inferiores y una menor probabilidad de sufrir un crecimiento deficiente.

Un "dosímetro biológico"

De todos los biomarcadores que viene estudiando Perera desde 1979, los que revisten mayor interés son los aductos HAP-ADN (HAP, de "hidrocarburos aromáticos policíclicos"). Ella y Tang miden esas sustancias en los leucocitos de niños que estuvieron expuestos a los gases que emitía la central eléctrica de Tongliang. Los HAP abarcan una familia extensa de compuestos que derivan de la combustión incompleta de materiales orgánicos (carbón sobre todo, otros combustibles fósiles, cigarrillos e incluso carne a la brasa). Se cuentan entre los contaminantes atmosféricos más frecuentes y dañinos. De los HAP a Perera le interesa su estructura molecular "pegajosa": muestran facilidad para formar fuertes enlaces covalentes con el ADN. Esos complejos ADN-contaminante, o aductos, perturban la duplicación del genoma durante la división celular, alterando las funciones de genes que promueven o evitan enfermedades.

La central eléctrica de carbón que se elevaba imponente sobre Tongliang era un verdadero Vesubio de HAP. Su cierre en 2004 cambió, de la noche a la mañana, las condiciones atmosféricas de la ciudad. Gracias a lo cual, Tongliang se convirtió en un caso único en el mundo de la epidemiología: un laboratorio en donde es posible medir el antes y el después de los efectos de los contaminantes del aire. La ciudad sigue sin estar muy limpia, pero los coches que pasan ya no levantan nubes negras de hollín y las familias pueden tender la ropa a secar durante más de unos minutos sin que las camisas blancas se vuelvan grises.

El equipo de Columbia instaló en torno a Tongliang monitores que medían la contaminación atmosférica. Las cifras confirman la mejora ambiental: la concentración de benzo(a) pireno, o BaP, uno de los HAP principales, cayó en torno a un 30 por ciento entre 2002 y 2005; la concentración de otros HAP bajó incluso más.

A Perera los cambios que le importan sobremanera son los que se producen en la población infantil. Desde 2002, con Tang y con Tin-yu, del Hospital Pediátrico de Chongqing, han estudiado a 450 niños que viven en un radio de dos kilómetros en torno a la central; han analizado su ADN y medido su desarrollo físico y mental desde el nacimiento. Los análisis preliminares muestran que los niños nacidos en 2002, cuando la central eléctrica seguía funcionando, tienen la cabeza más pequeña y obtienen puntuaciones más bajas en las pruebas de desarrollo que los nacidos en 2005, un año después del cierre de la central. También se han hallado diferencias a escala molecular: la concentración de aductos de BaP-ADN era un 40 por ciento superior en los leucocitos de los niños nacidos en Tongliang en 2002 que en los nacidos tres años después.

Más interesante todavía, en los niños nacidos en 2002, la concentración de aductos de BaP-ADN guardaba una estrecha relación con la circunferencia de la cabeza y con las puntuaciones en las pruebas de desarrollo. En otras palabras, cuanto más daño había sufrido

el ADN del niño mientras estaba en el seno materno, más probable era que naciese con una cabeza más pequeña y que lograra una puntuación inferior en las pruebas de habilidades motrices y de desarrollo general. Esas correlaciones eran más débiles en los bebés nacidos en 2005, prueba de que la contaminación atmosférica supone un riesgo menor cuando disminuyen los niveles globales. Por tanto, según Perera (cuyos estudios anteriores sugieren que el nivel de aductos está relacionado con el riesgo de cáncer), los niños nacidos en 2005 probablemente estarán menos expuestos a sufrir cáncer.

Los datos de Tongliang, junto con los resultados de estudios anteriores que Perera llevó a cabo en Polonia y en la ciudad de Nueva York, inducen a creer que los niveles de aductos en los leucocitos constituyen "dosímetros biológicos" fiables para la estimación del impacto de los HAP sobre el desarrollo neurológico. Si tal hipótesis resulta validada, las pruebas para detectar aductos podrían integrarse entre los criterios que guían a los pediatras en la identificación de niños con riesgo elevado de sufrir problemas del desarrollo y, por tanto, necesitados de tratamientos precoces.

En opinión de John D. Groopman, epidemiólogo molecular de la Universidad Johns Hopkins, el estudio comparado entre 2002 y 2005 arroja resultados de sumo interés, pues una de las etapas esenciales en la comprobación de la validez de los biomarcadores consiste en demostrar que una modulación del biomarcador se traduce en un efecto sobre la salud.

Encontrar Tongliang

Una bruma suave cubría la ciudad la mañana que llegué a Tongliang con Perera y Tang. Las colinas que ceñían por tres de sus lados parecían tan borrosas como debían de parecerlo en los días en que operaba la central eléctrica de carbón. La mayor parte de la electricidad de esa región tiene un origen hidroeléctrico. Sin embargo, dado que el deshielo no alimenta el río Yangtzé hasta la primavera, muchas de las ciudades más pequeñas han recurrido a primitivas centrales de combustión de carbón, que carecen de mecanismos de control de la contaminación, para superar el vacío de los meses de invierno. La central eléctrica de Tongliang consumía más de 4000 toneladas de carbón al mes entre noviembre y mayo. Se trataba de un carbón muy contaminante, con altas concentraciones de azufre que no se quemaba por completo. Cenizas y gases cargados de HAP escapaban de las chimeneas de 85 metros de altura de la central y se depositaban sobre la ciudad circundante formando una espesa capa.

En 2000, Perera había estado buscando un lugar así, para ampliar dos décadas de investigación sobre la función de los aductos HAP-ADN como indicadores del riesgo de enfermedades. Sus estudios iniciales, los primeros realizados en humanos, habían medido los niveles de aductos en el tejido pulmonar de pacientes adultos con cáncer [*véase* "Indicadores internos del riesgo de cáncer", por Frederica P. Perera; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1996]. Midió luego los niveles en madres e hijos que habitaban en vecindarios contaminados de la ciudad de Nueva York y de la industrial Cracovia. Encontró que las personas expuestas a la contaminación aérea tenían niveles de aductos en sangre superiores; dichos niveles estaban, a su vez, relacionados con la presencia de mutaciones génicas que constituyen conocidos factores de riesgo de cáncer y problemas de desarrollo en niños. Los niños de ciudades donde el aire era más limpio presentaban niveles de aductos inferiores y una menor probabilidad de sufrir un crecimiento deficiente.

Sin embargo, sus estudios se referían a un ámbito demasiado restringido. Cabía la posibilidad de que, en vez de la contaminación, fueran otras diferencias en el estilo de vida las que explicasen las variaciones en el estado de salud y en los niveles de aductos hallados entre madres e hijos que vivían en ciudades contaminadas y los que no vivían en dichas ciudades. Para proseguir su trabajo, Perera necesitaba encontrar una ciudad cuyas emisiones de HAP se hubieran reducido de forma drástica, para poder comparar el antes y el después en una población diferenciada.

China, con sus graves problemas ambientales y un gobierno autoritario capaz de cerrar de golpe una fuente importante de contaminación, constituía el candidato ideal. Y Tang era quien mejor podría dirigir el estudio que Perera planeaba realizar. Originario de Shanghái, Tang llevó a cabo su doctorado en salud pública en el laboratorio de Perera, con quien colaboró en numerosas investigaciones.

De entrada, habría que preparar la formación de un pequeño ejército de doctores y enfermeras chinos, que serían los encargados de recolectar sangre del cordón umbilical y placentas de las madres participantes en el estudio y de realizar pruebas cognitivas a los niños, a medida que fueran creciendo. También tendría que negociar con varios funcionarios, desde burócratas de Pekín hasta agentes locales, para conseguir la colaboración de los hospitales, obtener espacio para el laboratorio, importar equipos de control de la contamina-

El autor

Dan Fagin es profesor de periodismo y director del Programa de Reportajes sobre Ciencia, Salud y Medio Ambiente de la Universidad de Nueva York.



JUSTIN WEINSTEIN

2. LOS EPIDEMIOLOGOS MOLECULARES Frederica P. Perera y Deliang Tang evaluaron doce posibles lugares en China antes de decidir llevar a cabo en Tongliang su estudio de aductos de HAP-ADN.



Los resultados del estudio en China confirman investigaciones anteriores que indicaban que los aductos HAP-ADN operan a modo de "huellas" de la exposición a la contaminación. Esos aductos podrían también alterar las funciones de los genes que promueven o suprimen algunas enfermedades. Con una matización: si bien se han propuesto varios mecanismos, sigue sin conocerse el modo en que los aductos provocarían deficiencias del desarrollo en fetos en contacto con dichas sustancias.

"Los datos disponibles bastan para evidenciar la necesidad de reducir inmediatamente la exposición a esos contaminantes."
—Frederica Perera

ción y exportar muestras de sangre: asuntos políticamente delicados.

Perera y Tang evaluaron 12 lugares candidatos antes de decidirse por Tongliang, cuya central eléctrica debía cerrarse en el marco de un programa gubernamental que se proponía reemplazar las ineficientes centrales de combustión de carbón. Tongliang era una buena opción, no sólo porque la central iba a cerrarse, sino también porque la ciudad tenía pocas fuentes de contaminación importantes, al margen del tráfico de vehículos. El gas natural había ya sustituido a las estufas de leña y de carbón de la ciudad, donde no había grandes fábricas. Los cuatro hospitales locales que aceptaron participar en el proyecto generaban, en conjunto, suficientes casos para satisfacer los requisitos estadísticos del estudio: 150 mujeres no fumadoras, cuyo embarazo coincidiera con los meses en los que la central seguía activa. En los años posteriores al cierre de la central, se estudiarían los casos de otros recién nacidos y sus madres.

Sin embargo, cuando Perera y Tang llegaron a Tongliang en la primavera de 2002 para comenzar a reclutar mujeres embarazadas de acuerdo con el guión del estudio, se encontraron con una situación inesperada: la vieja controversia local sobre el cierre o no de la central persistía en toda su crudeza. Algunas madres llegaron a organizar una protesta silenciosa ante el edificio donde se estaban realizando las reuniones gubernamentales. (Una oposición rarísima en China.) Algunos miembros del gobierno local, preocupados por el impacto económico, estaban considerando la posibilidad de remodelar la central o trasladarla a las afueras, en lugar de cerrarla. Los investigadores de Columbia hubieron de esperar durante meses hasta que se tomara una decisión. Por fin, la publicidad relativa al estudio planeado ayudó a decidir la cuestión en favor del cierre. La vieja chimenea expulsó su última nube de humo gris en mayo de 2004.

Más complicaciones

Tres jóvenes padres ansiosos, con un cigarrillo en la boca, irrumpen en el abarrotado pasillo central de la Maternidad de la Región de Tongliang. Cerca de ellos pasan inadvertidos dos carteles de "Prohibido fumar". Los varones chinos son fumadores empedernidos. La mitad de la población masculina y dos tercios de los varones adultos con menos de 25 años fuman de forma habitual. El personal sanitario parece haber tirado la toalla en sus intentos de hacer respetar la prohibición de fumar.

En una habitación, al fondo del pasillo, médicos y enfermeras atienden cuidadosamente a Junshan Li, un niño nacido en la primavera de 2002, cuando la central eléctrica funcionaba a pleno rendimiento. Li es uno de los 150 participantes originales del estudio de Tongliang; sin embargo, hoy nada hace pensar que no sea un niño sano y activo (tan activo como para romperse la clavícula una semana antes en un accidente en el parque). Pero Li no ha venido hoy al hospital por la lesión de clavícula, sino para realizar su control anual de desarrollo. Ahora mismo, está sentado en el borde de una silla; grita con emoción los

3 POSIBLES INFLUENCIAS DE LOS ADUCTOS SOBRE EL FETO

Disminución de la capacidad del feto de obtener nutrientes y oxígeno, debido al bloqueo de receptores de la placenta

Liberación de enzimas que alteran el metabolismo o modificación de niveles de hormonas del crecimiento

Confusión cerebral que resulta en la eliminación de sinapsis esenciales

?

4 CONSECUENCIAS

Recién nacido más pequeño de lo normal, con riesgo de trastornos del desarrollo.

MELISSA THOMAS (*figuras humanas*); KEN EWARD *BioGrafx* (*estructuras moleculares*)

números en chino: "¡Ba!"... "¡San!"... "¡Qui!", en respuesta a las sencillas cuestiones aritméticas que le plantea la evaluadora, una joven pediatra llamada Xu Tan. El objetivo de Tan consiste en estimar el crecimiento, mental y físico, de Li; luego lo pesará, medirá su altura y la circunferencia de la cabeza.

La escena del hospital ilustra uno de los principales retos de la epidemiología molecular. Las deficiencias en desarrollo y crecimiento que Perera y Tang están estudiando para hallar su vinculación con la exposición prenatal a la contaminación por HAP son sutiles y pueden tener múltiples causas; entre ellas, el humo inhalado por fumadores pasivos (procedente, por ejemplo, de los padres que fumaban al otro extremo del pasillo). Para minimizar el problema de las causas alternativas, los investigadores han estudiado sólo a madres no fumadoras con embarazos de bajo riesgo; les han preguntando sobre su educación, los hábitos familiares en relación con el tabaco, la exposición a los HAP a través de carnes cocidas a la brasa y otros alimentos, así como algunos otros factores que podrían introducir confusión en el estudio. Midieron también los niveles sanguíneos de antioxidantes y metales neurotóxicos, puesto que podrían afectar al desarrollo de los niños.

Parece, pues, razonable pensar que las correlaciones que han hallado entre los niveles de aductos en los niños de Tongliang y diversas variables que miden el crecimiento y el aprendizaje se deben a la contaminación atmosférica.

Aunque estadísticamente significativas, las diferencias entre los niños de Tongliang nacidos en 2002, cuando la central eléctrica estaba todavía operativa, y los nacidos en 2005, después del cierre, son reducidas: unos pocos milímetros en la altura y la circunferencia de la cabeza, un par de docenas de gramos de peso corporal y un punto o dos en una prueba de desarrollo.

En su interpretación de los datos, Perera entiende que los niños de 2002 tendrán una mayor probabilidad de sufrir dificultades en el aprendizaje y de necesitar una ayuda extra en el colegio; asimismo, desarrollarán las habilidades motrices finas más tarde que la media de los niños nacidos en 2005.

Esos efectos sutiles sobre la salud han constituido siempre una fuente de polémica en la investigación de los biomarcadores. En los años setenta y ochenta del siglo pasado, Herbert L. Needleman, hoy en la Universidad de Pittsburgh, promovió el estudio de los niveles de plomo en varias poblaciones. Midió la concentración del metal en dientes de leche triturados. Descubrió correlaciones con la disminución de la capacidad de aprendizaje y un comportamiento delictivo. Sin embargo, la naturaleza incierta de los problemas neurológicos que encontró Needleman y los niveles tan bajos de plomo que midió hicieron que su trabajo recibiera fuertes críticas del sector del plomo. Por fin, se comprobaron sus hallazgos. Actualmente gozan de una gran aceptación y se consideran un argumento clave para la eliminación del plomo de la gasolina y las pinturas.

DATOS BASICOS



- El carbón proporciona alrededor del **70 por ciento** de la energía que se consume en China.
- En China se encuentran **2 de los 10** lugares más contaminados del planeta, según las evaluaciones del Instituto Blacksmith: Linfen y Tinaying.
- Según la Organización Mundial de la Salud, las enfermedades provocadas por la contaminación atmosférica causan la muerte de **656.000** ciudadanos chinos cada año, la incidencia más alta del mundo.



3. ORIGENES NEBULOSOS: Al igual que la contaminación atmosférica, también el tabaco, la dieta y la predisposición genética pueden contribuir al desarrollo de varios trastornos. De ahí la dificultad de acotar el impacto específico de la contaminación. En Tongliang, se han hallado correlaciones entre los niveles de aductos y retrasos del desarrollo en la población infantil (incluso tras descartar el efecto de otros posibles factores).



GREG BAKER *Ap Photo*

LOS PROXIMOS PASOS

- Continuar estudiando a los niños de Tongliang durante al menos cuatro años más, para evaluar el desarrollo y la salud respiratoria hasta la edad de 10 años. Se medirán varios biomarcadores: aductos HAP-ADN, alteraciones epigenéticas, plomo y mercurio.

- Evaluar si algunos niños de Tongliang corren un mayor riesgo de sufrir enfermedades que otros, debido a las interacciones entre la exposición prenatal a los contaminantes y los factores de susceptibilidad genéticos y nutricionales, que varían de un niño a otro.

- Realizar un análisis combinado de los datos de estudios paralelos en curso de 1500 parejas de madres e hijos en los EE.UU., Polonia y China. Con ello se pretende evaluar los riesgos de la exposición prenatal a la contaminación atmosférica y estudiar las interacciones entre exposición y susceptibilidad en distintos grupos étnicos y a lo largo de todo un gradiente de niveles de exposición.

Asimismo, los intentos de reducir el impacto del tabaco sobre los fumadores pasivos se apoyaban en trabajos que medían los niveles de cotinina en sangre y orina. La concentración de la más importante de las sustancias en las que se degrada la nicotina se ha convertido, en mujeres embarazadas y recién nacidos, en un marcador rutinario cuando se trata de investigar los vínculos entre el humo del tabaco y una amplia gama de alteraciones del desarrollo infantil.

Queda por mencionar una complicación adicional a la hora de extraer conclusiones sobre los efectos en la salud a partir de biomarcadores moleculares. Si bien las concentraciones de plomo, cotinina o aductos de HAP-ADN son fáciles de medir en sangre, no significa eso que estén llegando en la misma dosis al cerebro o a otros órganos en los que se puedan producir daños. Ciertas investigaciones anteriores sobre los aductos (algunas emprendidas por la misma Perera) sugieren que los leucocitos son buenos "representantes" de los órganos diana (cerebro y pulmones). Pero los contaminantes no suelen distribuirse de manera uniforme por el organismo. Sin olvidar que las diferencias metabólicas provocan grandes variaciones entre individuos, aunque formen parte de una población uniforme que respira el mismo aire o bebe la misma agua.

Los aductos ofrecen una ventaja importante con respecto a las mediciones de los niveles sanguíneos de plomo y cotinina. No indican sólo que un contaminante está presente en el cuerpo, sino también que provoca un efecto discernible: la alteración de las moléculas de ADN. Mas el asunto no se libra de puntos débiles: hay posturas discrepantes sobre el modo en que la formación de aductos alteraría el desarrollo infantil. En la investigación del cáncer (campo en que Perera realizó sus primeros trabajos con aductos), la conexión se nos ofrece más nítida, habida cuenta de que la capacidad de un aducto de perturbar la duplicación del genoma durante la división celular provocaría mutaciones y otros cambios génicos que determinan la malignicidad celular. Con respecto a las carencias del desarrollo infantil, las teorías son más nebulosas.

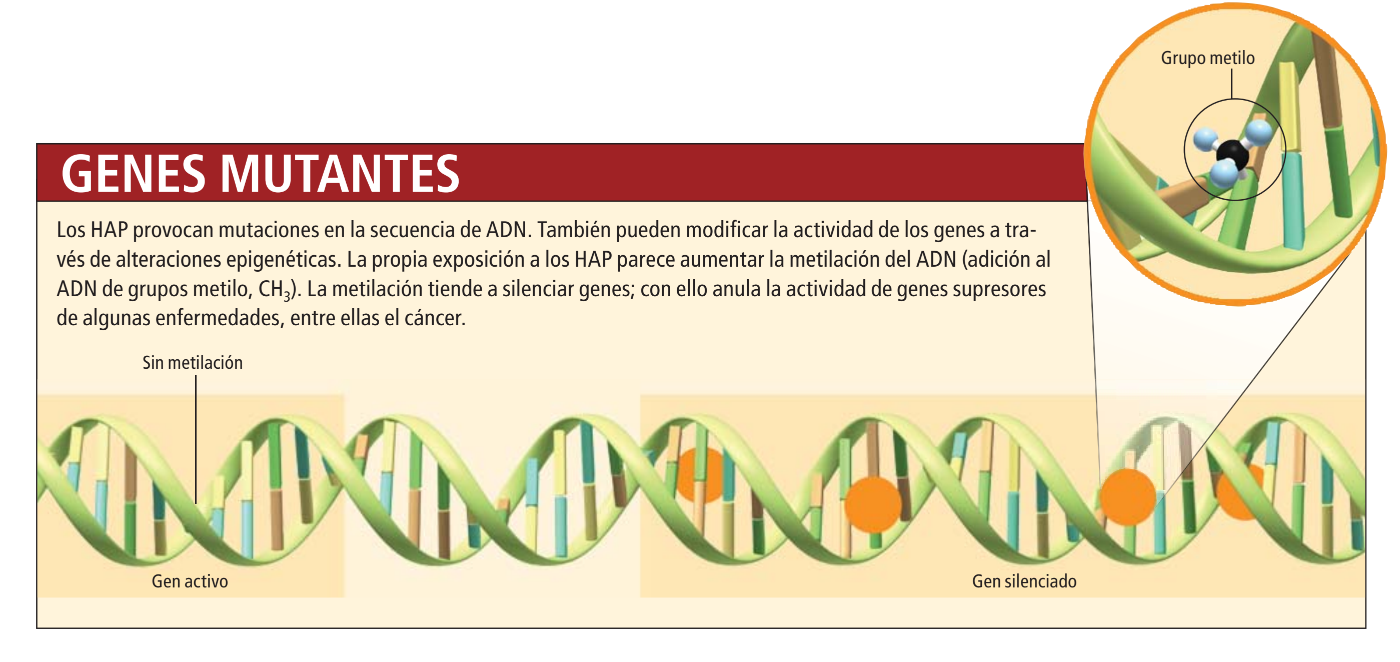
Una de las ideas principales sobre el modo en que los HAP pueden afectar al cerebro guarda relación con la poda neuronal, o muerte controlada de las células nerviosas, que se produce conforme el cerebro en desarrollo se ajusta al entorno y aumenta su eficiencia, eliminando las sinapsis que no necesita. La presencia de HAP puede alterar las funciones cerebrales mediante la extensión de ese proceso de apoptosis a sinapsis esenciales, ya sea en el seno de la madre o durante los comienzos de la vida del niño.

Otra teoría prominente establece que los HAP ocupan los receptores moleculares en la placenta y así perturban la capacidad del feto de obtener nutrientes y oxígeno. Los contaminantes pueden también desencadenar la liberación de enzimas que alteran el metabolismo en el feto y en el niño pequeño; quizás alteren también los niveles de las hormonas que regulan el crecimiento. La respuesta más probable es que la mayoría, si no la totalidad, de esos mecanismos afecten al cerebro del niño expuesto a niveles elevados de contaminación atmosférica.

"En el último decenio hemos conocido la multiplicidad de mecanismos que subyacen bajo trastornos comunes", afirma Groopman, cuyos estudios en China y otros lugares se han centrado en la interacción entre aflatoxinas y virus de la hepatitis B humano para provocar cáncer de hígado. Las aflatoxinas, sintetizadas por el hongo *Aspergillus*, constituyen un contaminante habitual en la comida de China y Africa. En este caso, se relacionan un compuesto y una enfermedad concreta. No hay otros factores que introduzcan confusión en el proceso. La relación entre los HAP y el desarrollo infantil, en cambio, entraña mayor complejidad.

Los próximos pasos

Perera y Groopman están de acuerdo en que el próximo paso consistirá en ampliar la escala de su trabajo. Una investigación más ambiciosa, con mayor significación estadística y en la que participen miles de niños, podría descubrir



GENES MUTANTES

Los HAP provocan mutaciones en la secuencia de ADN. También pueden modificar la actividad de los genes a través de alteraciones epigenéticas. La propia exposición a los HAP parece aumentar la metilación del ADN (adición al ADN de grupos metilo, CH_3). La metilación tiende a silenciar genes; con ello anula la actividad de genes supresores de algunas enfermedades, entre ellas el cáncer.

KEN EWARD *BioGrafx*

correlaciones más estrechas entre la exposición a los HAP y trastornos del desarrollo. Mientras tanto, habrá que ahondar en las complejidades de la química neuronal y hallar nuevos biomarcadores que permitan medir mejor los cambios cerebrales que repercuten negativamente en el crecimiento y aprendizaje. Una investigación que ha comenzado en el campo de la epigenética, el estudio de los cambios heredables e inducidos por el entorno que alteran la función de los genes sin cambiar su secuencia, como hacen los aductos de HAP.

Según Perera, los HAP producen cambios epigenéticos que no se pueden identificar a partir de roturas o perturbaciones en el código genético. Dado que los aductos no son representativos de los cambios epigenéticos, Perera y otros epidemiólogos moleculares comienzan a mirar hacia otros biomarcadores; por ejemplo, la metilación (adición de grupos metilo) del ADN, que suele silenciar a los genes. Algunos datos sugieren que la metilación aumenta con la exposición a los HAP y evita que los genes insten la síntesis de proteínas que participan en la supresión de algunas enfermedades, cáncer incluido.

Si los cambios epigenéticos resultasen esenciales para la alteración de la capacidad de un niño de crecer y aprender, la medición de los grupos metilo podría convertirse en dosímetro del impacto de la contaminación sobre el cerebro, mucho mejor que la medición de los niveles de aductos HAP-ADN. El estudio de Tongliang podría ayudar a dilucidar la cuestión, pues Perera y Tang se proponen analizar todas las muestras de sangre de Tongliang para medir la metilación del ADN y quizás otros marcadores epigenéticos.

Llegará el día en que los médicos realicen a los niños pruebas para evaluar biomarcadores, genéticos y epigenéticos, para determinar el riesgo de desarrollar una amplia gama de trastornos en la salud y el crecimiento. Por ahora, sin embargo, los niños como la del cobertizo de carbón abandonado en Tongliang deberán confiar en su gobierno para que los protejan de los HAP y otros contaminantes atmosféricos. Tongliang ofrece un claro ejemplo de la capacidad de los gobiernos para tomar medidas que reduzcan la exposición a los contaminantes. Allí, las mejoras que resultan de la reducción de la contaminación no se adivinan; pueden medirse. Semejante posibilidad de medir causas y efectos reviste especial importancia en China y otros países con un desarrollo rápido, que deben tomar decisiones controvertidas sobre si continuar utilizando grandes cantidades de carbón o sustituirlo por fuentes de energía más limpias, aunque más costosas.

Perera subraya que la complejidad y los puntos obscuros de la epidemiología molecular no deberían menoscabar el mensaje global que se desprende de los datos acumulados durante 29 años de estudio en torno a los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud en Finlandia, Polonia, China y su propio vecindario neoyorquino. La tesis es tan relevante para países desarrollados como para la contaminada China, pues los HAP están muy extendidos y afectan, incluso a concentraciones reducidas, a los niños. En la ciudad de Nueva York, donde los niveles de HAP en el aire son más de 10 veces inferiores a los de Tongliang, se han medido los efectos en términos de reducción del crecimiento fetal e impacto en el desarrollo neurológico. No nos hallamos ante una amenaza especulativa difusa, cuya demostración depende de estudios ulteriores; bastan los datos disponibles para evidenciar la necesidad de reducir inmediatamente la exposición a esos contaminantes.

Mientras Perera y Tang continúan analizando los datos de Tongliang, sopesan la posibilidad de acometer un estudio a mayor escala, basado en el mismo enfoque comparativo entre el "antes" y el "después".

Bibliografía complementaria

MOLECULAR EPIDEMIOLOGY: ON THE PATH TO PREVENTION? Frederica P. Perera en *Journal of the National Cancer Institute*, vol. 92, n.º 8, págs. 602-612; 19 de abril, 2000.

EFFECT OF PRENATAL EXPOSURE TO AIRBORNE POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS ON NEURODEVELOPMENT IN THE FIRST 3 YEARS OF LIFE AMONG INNER-CITY CHILDREN. Frederica P. Perera, Virginia Rauh, Robin M. Whyatt, Wei-Yann Tsai, Deliang Tang, Diurna Díaz, Lori Hoepner, Dana Barr, Yi-Hsuan Tu, David Camann y Patrick Kinney en *Environmental Health Perspectives*, vol. 114, n.º 8, págs. 1287-1292; agosto, 2006.

DEVELOPMENT NEUROTOXICITY OF INDUSTRIAL CHEMICALS. Philippe Grandjean y Philip J. Landrigan en *Lancet*, vol. 368, págs. 2167-2178; 16 de diciembre de 2006.

MOLECULAR EPIDEMIOLOGY AND BIOMARKERS IN ETIOLOGIC CANCER RESEARCH: THE NEW IN LIGHT OF THE OLD. Paolo Vineis y Frederica Perera en *Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention*, vol. 16, n.º 10, págs. 1954-1965; octubre de 2007.



Grupos simples en juego

El cubo de Rubik ha servido de inspiración para nuevos juegos. Quienes intenten resolverlos descubrirán los recovecos de cierto tipo de ente matemático: los grupos simples esporádicos

Igor Kriz y Paul Siegel

CONCEPTOS BASICOS

- El éxito en la "resolución" del cubo de Rubik depende del descubrimiento de breves secuencias de movimientos para realizar tareas concretas.
- Esa estrategia es tan eficaz, que los autores ansiaban nuevos rompecabezas cuya solución exigiera tácticas nuevas.
- Los autores, basando su trabajo en la teoría matemática de grupos que tan bien ilustra el cubo de Rubik, han diseñado tres nuevos juegos, que desafían a la actual generación de aficionados con las complejidades de los "grupos simples esporádicos".

Millones han sido quienes en algún momento se sintieron perplejos ante el cubo de Rubik, un rompecabezas fascinante que invadió el mundo en los años ochenta del pasado siglo. Si por alguna razón el lector no conoce este juego —o los años ochenta—, le explicaremos que se trata de un artilugio de plástico, aparentemente formado por 27 cubitos apilados para formar un cubo mayor, de tres cubitos de arista. Cada una de las seis caras del cubo grande está coloreada con uno de seis colores vivos, de ordinario, azul, verde, naranja, rojo, amarillo y blanco. Decimos que el cubo *parece* un apilamiento de cubitos, pero las apariencias engañan. Un ingenioso mecanismo, inventado en 1974 por un profesor húngaro, Ernö Rubik (y en 1976, con independencia de Rubik, por el ingeniero japonés Terutoshi Ishige), permite que cualquiera de las seis caras cuadradas del cubo grande pueda girar en torno al centro de esa cara (*véase el recuadro* "Codificación del cubo de Rubik"). Si las caras se giran al azar cinco o seis veces seguidas, se tiene un cubo tan desordenado, que sólo un jugador muy experto será capaz de restaurar su estado original. Y ése es el objeto del rompecabezas: devolver el cubo, arbitrariamente desordenado, a su estado original, en el que cada cara es de un solo color.

El cubo de Rubik, los poliedros de Rubik y otras muchas variantes posteriores son "problemas de permutaciones". Se los llama así porque se fundan en movimientos que reubican —el término matemático es "permutan"— las piezas del rompecabezas (en el cubo de Rubik, los cubitos). En cada caso, el problema consiste en devolver a una ordenación predeterminada una cierta disposición de las piezas. Los problemas de permutaciones se hallan íntimamente relacionados con una entidad matemática, los grupo de permutaciones, integrada por el conjunto de todas las secuencias de movimientos lícitos que conducen a diferentes disposiciones de los objetos del rompecabezas.

Los grupos vienen a ser generalizaciones de la aritmética ordinaria. El conjunto de los números enteros, positivos y negativos, 0, 1, –1, 2, –2, ..., con la operación de adición, que combina estos números de dos en dos,





constituye un grupo. Pero los grupos pueden estar compuestos por otras clases de entes: por giros y simetrías de objetos materiales, por diversos tipos de permutaciones efectuadas sobre conjuntos de letras u objetos, por matrices numéricas o por tantas otras cosas. Lo esencial es que el grupo cuente con una operación bien definida que combine de dos en dos los entes que lo componen, que el resultado de cada combinación sea siempre un miembro del grupo y que esta operación posea ciertas propiedades razonables.

La teoría de grupos, amén de su importancia en la matemática pura, cuenta con poderosas aplicaciones extramatemáticas en cristalografía, física de partículas, teoría de cuerdas e incluso en telecomunicaciones. Y la búsqueda de procedimientos generales para resolver el cubo de Rubik ha resultado un método formidable para desarrollar la intuición acerca de cómo se combinan los elementos de ciertos grupos abstractos.

Lograda la maestría en el cubo, a menudo se observa que las estrategias que se utilizan para resolverlo evidencian pareja eficacia en casi todas las imitaciones permutacionales inspiradas en él. Y, francamente, alcanzado tal punto, los rompecabezas de este tipo, basados en permutaciones, pierden mucho interés. Esa fue nuestra experiencia con el cubo. Sabíamos que existían buenas razones matemáticas para nuestro desencanto: todos los rompecabezas inspirados en el cubo constituyen representaciones de grupos de cierta categoría general y, por consiguiente, todos ceden cuando se los ataca con los mismos procedimientos generales. Pero esos grupos no agotan la diversidad matemática del concepto de grupo.

Deseábamos encontrar una forma de hacer más fácil la comprensión de grupos totalmente diferentes de los representados por el cubo. Buscamos una nueva serie de rompecabezas cuyas soluciones exigieran métodos sustancialmente diferentes de los utilizados en el cubo de Rubik y afines.

Desarrollamos tres juegos nuevos, basados en los grupos simples esporádicos. Constituyen problemas nuevos en el sentido de que no ceden ante los métodos que resuelven el cubo de Rubik.

Los rompecabezas y sus grupos

Para resolver los nuevos juegos conviene saber algunas cosas sobre los grupos simples esporádicos a partir de los que han sido construidos, así como sobre sus diferencias con respecto al grupo representado en el cubo de Rubik, el “grupo de Rubik”. Los grupos pueden tener un número finito o infinito de elementos. El grupo aditivo de los números enteros posee, obviamente, infinidad de elementos. En cambio, el número de elementos del grupo de Rubik es finito, a pesar de que el conjunto de todas las secuencias posibles de movimientos del cubo sea infinito. La razón es que, si dos secuencias de movimientos conducen desde una misma disposición inicial de los cubitos hasta una misma disposición final, ambas se consideran equivalentes. En el cubo de Rubik, el número de diferentes configuraciones de los cubitos es astronómica, alrededor de 4×10^{19} (exactamente, 43.252.003.274.489.856.000), por lo que el número de elementos —combinaciones de movimientos que tienen distinto efecto— del grupo representado por el cubo es colosal. Pero finito.

A pesar de la vastedad de este “espacio” de movimientos, no resulta difícil dar con una solución del cubo ateniéndose a unas cuantas indicaciones generales. Se necesita papel, lápiz y un cubo de Rubik, preferiblemente en su ordenación inicial. Nuestro objetivo es

ESTOS NUMEROS “HUMANIZADOS” ejecutan una danza imaginaria mientras se reorganizan según el movimiento “fusión” en el nuevo rompecabezas M_{12}, ideado por los autores. M_{12} es uno de los tres “rompecabezas simples esporádicos” que han creado.

Los autores

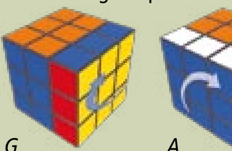
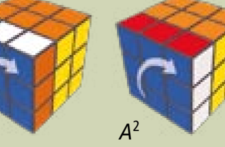
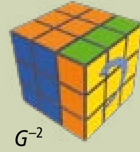
Igor Kriz, doctorado por la Universidad Carolina de Praga y profesor de matemáticas en la Universidad de Michigan en Ann Arbor, investiga en topología algebraica y en física matemática. **Paul Siegel** realizó este trabajo siendo estudiante en la Universidad de Michigan. Actualmente prepara su doctorado en la Universidad estatal de Pennsylvania.

CODIFICACION DEL CUBO DE RUBIK

La resolución de los nuevos rompecabezas de los autores se cimienta en técnicas desarrolladas para el estudio de las estructuras matemáticas denominadas grupos. Una técnica esencial, tomada de la teoría de grupos, consiste en especificar un sistema sencillo y unívoco para denotar los elementos del grupo y la forma en que se combinan.

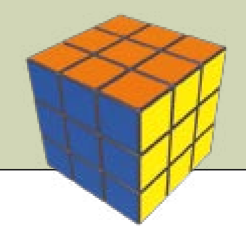
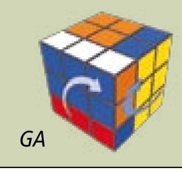
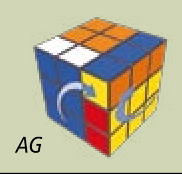
NOTACIONES

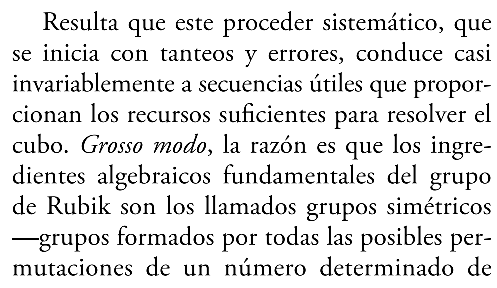
El cubo de Rubik puede entenderse como representación material de un grupo cuyos elementos son los movimientos posibles —los giros que se pueden aplicar a cada cara— y cuya combinación podríamos llamar operación "y después": "efectuar cierto giro y después efectuar tal otro". Como se ve en la ilustración de la derecha, independientemente de cómo se haya desordenado el cubo, los "cubitos" centrales de las caras no cambian de lugar: sólo giran en torno a su centro. Así pues, cada movimiento que se efectúe sobre el cubo puede representarse con la primera letra del cubito central: *A*zul, *B*lanco, *G*ualda, *N*aranja, *R*ojo y *V*erde, más algún procedimiento para denotar cuántos grados se gira la cara. Cada letra indica que la cara correspondiente ha de girar 90 grados en sentido horario, mirando desde el exterior del cubo (giros *G* y *A* en el diagrama). El exponente de las letras permite denotar otros tipos de giros. A^2 gira 180 grados la cara *A*, mientras que G^{-1} denota un giro de 90 grados de la cara amarilla en sentido contrario a las agujas del reloj (*abajo*). La orientación del cubo puede especificarse por los colores de los tres cubitos centrales visibles en un orden determinado por el sentido de giro del reloj, empezando por el cubito central de la cara superior. En todas las figuras presentadas la orientación es la misma: *NGA*.

INDICACION: EL ORDEN ES FUNDAMENTAL

El orden de la secuencia de movimientos es crucial para resolver el cubo; la notación ha de plasmarlo. Los movimientos compuestos *GA* y *AG* no conducen desde una disposición inicial dada a una misma configuración final.

doble. Hace falta, en primer lugar, una forma adecuada de consignar nuestros movimientos (*véase el recuadro* "Codificación del cubo de Rubik"). Y, en segundo, hay que descubrir una serie de secuencias breves de movimientos (que es necesario anotar) para realizar determinadas tareas concretas: por ejemplo, para el intercambio de ciertos pares de cubitos triédricos (situados en los vértices) o diédricos (en mitad de las aristas). La idea consiste en combinar de forma sistemática estas secuencias para resolver un cubo desordenado.

Resulta que este proceder sistemático, que se inicia con tanteos y errores, conduce casi invariablemente a secuencias útiles que proporcionan los recursos suficientes para resolver el cubo. *Grosso modo*, la razón es que los ingredientes algebraicos fundamentales del grupo de Rubik son los llamados grupos simétricos —grupos formados por todas las posibles permutaciones de un número determinado de objetos distinguibles— juntamente con sus parientes cercanos, los grupos alternados, cada uno de los cuales contiene la mitad de los elementos del grupo simétrico. Así, el grupo simétrico S_3 consta de todas las permutaciones posibles de tres objetos, cuyo número es $1 \times 2 \times 3 = 6$ (*véase el recuadro* "¿Qué es un grupo simple esporádico?"); emparentado con él hallamos el grupo alternado A_3, que tiene tres elementos. Entre los grupos simétricos emparentados con el grupo de Rubik se cuentan el grupo simétrico S_8 (compuesto por la totalidad de las 8! = 40.320 permutaciones en que pueden ser reordenados los ocho cubitos de los vértices) y el grupo simétrico S_{12} (las 12! = 479.001.600 formas de reordenar los 12 cubitos diédricos de las aristas).

"Atomos" de simetría

Nuestros rompecabezas son problemas de permutaciones. Cada uno de ellos está basado, sin embargo, en alguno de los grupos simples esporádicos. Para comprender qué es un grupo simple esporádico se ha de partir del concepto de subgrupo. Imagine que solamente es lícito hacer girar las caras azul y amarilla del cubo de Rubik. Con esta restricción nunca será posible mover el cubito diédrico de colores verde y blanco. Por lo tanto, el número de distintas secuencias de estos movimientos restringidos será menor que el número de elementos del grupo de Rubik como un todo. Cuando la totalidad de las combinaciones de cierto subconjunto de movimientos del grupo de un rompecabezas son también movimientos pertenecientes a ese subconjunto, éste constituye un subgrupo. El concepto de grupo simple es un tanto técnico; baste decir que un grupo es simple si carece de "subgrupos normales propios" (*puede verse una explicación detallada en el recuadro* "¿Qué es un grupo simple esporádico?").

Puede que el calificativo "simple", tal y como se utiliza en la teoría de grupos, sea uno de los más engañosos de la historia de la matemática. Entre los grupos simples se cuentan algunas de las entidades más complejas que se conocen en la disciplina. A pesar de ello, se les llama "simples" porque constituyen los "ladrillos" o "átomos" con que se edifica la teoría de grupos. Los grupos simples son, en cierto sentido, como los números primos, que sólo son divisibles por sí mismos y por 1. Todo grupo finito admite una "descomposición" única en grupos simples, al igual que un número puede descomponerse unívocamente en factores primos.

Los grupos finitos simples están identificados y clasificados en su totalidad. Fueron descubiertos entre los años 1860 y 1980, y

GEORGE RETSECK (*cubos*)

su clasificación se efectuó casi por completo entre los últimos años cuarenta y primeros ochenta del siglo pasado, si bien, con algunas enmiendas posteriores. Esta enorme tarea fue realizada por centenares de matemáticos. Las comunicaciones sobre descubrimientos de grupos simples y la demostración de que se había logrado confeccionar la lista definitiva han consumido más de 10.000 páginas en las revistas profesionales de matemática, repartidas en unos 500 artículos.

Se sigue trabajando para lograr una versión más compacta y sencilla de esta demostración, que podría facilitar la comprensión de los grupos simples. Pero la demostración con la que ya contamos hace ver que existen 18 familias de grupos finitos simples —cada familia es una colección infinita compuesta por categorías específicas de grupos—, más otros 26 grupos, entes individualistas y excéntricos, los llamados grupos esporádicos, que constituyen en esencia entidades matemáticas autónomas. Y no hay más.

Rompecabezas simples esporádicos

Hemos construido rompecabezas basados en tres grupos simples esporádicos, los M_{12}, M_{24} y Co_1. Estos rompecabezas, al igual que el cubo de Rubik, son de naturaleza combinatoria, pero las permutaciones que los grupos simples esporádicos representan son mucho más estrictas que los grupos simétricos; se exige más a las permutaciones consentidas. En consecuencia, muchas de las disposiciones de números de nuestros rompecabezas son inaccesibles, por muchos movimientos que se hagan.

Como ya se ha dicho, la estrategia que funciona para resolver el cubo y otros juegos basados en grupos simétricos no es de aplicación en nuestros nuevos problemas. Pero sí será posible desarrollar otras estrategias con que se den algunas ligeras indicaciones concernientes a estos grupos.

El más sencillo de nuestros tres rompecabezas es M_{12}, que se basa en el grupo simple esporádico de igual nombre. El grupo M_{12} es uno de los cinco primeros grupos simples esporádicos que se conocieron. Los descubrió el matemático francés Émile Mathieu, en los años sesenta del siglo XIX, en cuyo honor se denominan grupos de Mathieu. Quien se proponga resolver nuestro primer rompecabezas se ha de enfrentar a una secuencia de los números de 1 a 12 dispuestos en hilera, pero desordenados de una forma especial. Sólo hay dos movimientos lícitos, que se aplican tantas veces cuantas se desee a cualquier secuencia. El objeto del rompecabezas consiste en restaurar a su orden habitual (1, 2, ..., 12) la secuencia desordenada.

Vamos a darles un indicio a los osados que deseen medirse con nuestros problemas. En el rompecabezas M_{12} (y en el grupo) es posible mover cinco cualesquiera de los 12 números a cualesquiera cinco de las 12 posiciones de la hilera. Una vez conseguido esto, todos los demás números quedan colocados: el rompecabezas está resuelto. La razón es que el grupo M_{12} consta de $12 \times 11 \times 10 \times 9 \times 8 = 95.040$ permutaciones, tantas cuantas formas de seleccionar 5 de los 12 números e ir colocándolos en un lugar de la secuencia. (El primer número puede ocupar cualquiera de las 12 posiciones, el segundo, una de las 11 restantes, y así sucesivamente.) Puesto que en este grupo la permutación completa queda especificada al fijar las posiciones de cinco números, carece de sentido buscar secuencias de movimientos que sólo desplacen a dos o tres. A excepción del movimiento nulo, que deja la hilera en la misma disposición que tiene, cada movimiento debe dejar menos de cinco números fijos. Dicho de otro modo, cada secuencia no trivial

TRES ROMPECABEZAS, TANTISIMOS MOVIMIENTOS

- Rompecabezas M_{12}, basado en el grupo de Mathieu M_{12}: 95.040 permutaciones
- Rompecabezas M_{24}, basado en el grupo de Mathieu M_{24}: 244.823.040 permutaciones
- Rompecabezas Dotto, que representa al grupo de Conway Co_0: 8.315.553.613.086.720.000 permutaciones

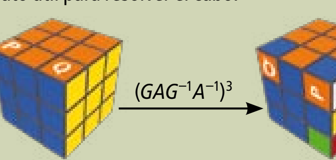


DESCODIFICACION DEL CUBO

Los rompecabezas clásicos basados en permutaciones, como el cubo de Rubik, cuyo objeto consiste en recolocar las piezas en una configuración predeterminada, suelen ser resolubles aplicando una estrategia de dos pasos:

PASO 1

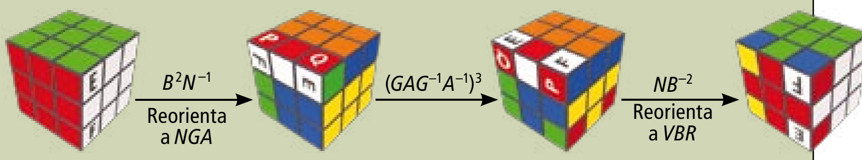
Se procede por tanteo. Se selecciona primero, al azar, una secuencia breve de movimientos, como $GAG^{-1}A^{-1}$ (esta notación se explica en el recuadro "Codificación del cubo de Rubik"). Esta secuencia aleatoria se ejecuta varias veces. A menudo se acaba en una disposición en la que han cambiado de lugar muy pocos cubitos, dato útil para resolver el cubo. En este caso, tres repeticiones de $GAG^{-1}A^{-1}$, es decir, $(GAG^{-1}A^{-1})^3$, intercambian entre sí dos pares de cubitos triédricos: los dos que tienen una cara azul y otra anaranjada (rotulados *P* y *Q* a la derecha) y los dos con caras amarilla y roja.



Cubo virgen (orientación *NGA*)

PASO 2

Se modifica y generaliza el movimiento útil descubierto. Por ejemplo, para intercambiar el par de vértices de colores blanco y rojo (rotulados con *E* y *F* en un cubo "virgen" como vemos abajo, para mayor claridad en la orientación *VBR*) se busca un movimiento de "preparación" previo al "movimiento útil". Tras el movimiento preparatorio B^2N^{-1}, los cubitos vértice *E* y *F* se trasladan a las posiciones *P* y *Q* (para mayor claridad, las caras del cubo han sido reorientadas de *VBR* a *NGA*). Se puede aplicar ahora el movimiento útil $(GAG^{-1}A^{-1})^3$ y deshacer la secuencia de preparación ejecutando los movimientos contrarios en orden inverso, NB^{-2}; así se restaura la orientación inicial *VBR* de las caras del cubo. El efecto neto ha sido el intercambio de los dos cubitos vértice *E* y *F* (*bajo estas líneas*).



Cubo virgen (*orientación VBR*)

Se puede hallar una secuencia preparatoria similar para mover una pareja cualquiera de cubitos vértice hasta uno de los dos pares intercambiados por $(GAG^{-1}A^{-1})^3$. Así pues, podemos construir un movimiento específico para intercambiar un par cualquiera de cubitos vértice. Procediendo de igual manera con otras secuencias aleatorias, se consigue la flexibilidad suficiente para resolver el cubo o cualquier otro rompecabezas clásico basado en permutaciones.

GEORGE RETSECK (*cubos*)



de movimientos ha de desplazar al menos a ocho de los 12 números.

Para corazones fuertes

Nuestro segundo rompecabezas, M_{24}, consta de 23 números dispuestos en círculo, como las horas en la esfera de un reloj, más un vigésimo cuarto número situado fuera del círculo, a las 12. Al igual que en el caso del M_{12}, hay sólo dos movimientos lícitos. En teoría, el rompecabezas M_{24} podría fabricarse con elementos materiales, en lugar de representarlo con un ordenador: el círculo de 23 números se movería mediante un dispositivo rotativo; un sistema de engranajes intercambiaría pares de números según dictasen los movimientos.

El grupo de permutaciones generado por los dos movimientos de M_{24} es el grupo de

¿QUE ES UN GRUPO SIMPLE ESPORADICO?

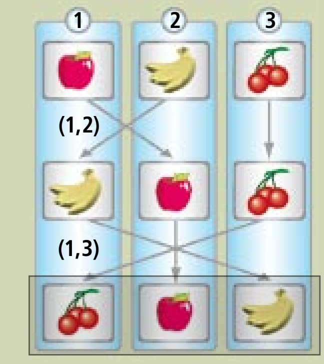
Los tres nuevos rompecabezas representan grupos simples esporádicos de permutaciones. Para entender la expresión de marras se necesitan algunos preliminares.

NOTACION, NOTACION Y NOTACION

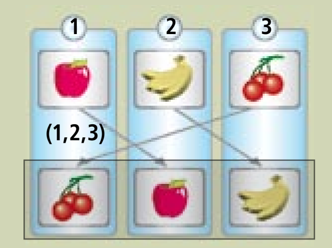
El grupo simétrico S_n es el grupo de todas las permutaciones posibles de *n* objetos, es decir, todas las formas de colocar *n* objetos o símbolos en hilera. El grupo simétrico S_3, por ejemplo, está formado por el conjunto de las seis permutaciones que dan origen a las seis formas de alinear tres objetos distintos. En todos los grupos de permutaciones se incluye la permutación "identidad" denotada (1), que deja cada objeto donde estaba.

La permutación (1, 2) intercambia los objetos situados en los puestos primero y segundo (*a la derecha*).

La permutación (1, 3) intercambia los objetos situados en los puestos primero y tercero. La aplicación de (1, 3) al resultado de efectuar (1, 2) se denota (1, 3) ∘ (1, 2). Resulta la disposición de la derecha.



La combinación de estas dos permutaciones equivale a la aplicación de una sola permutación, denotada (1, 2, 3), con lo que se expresa que los puestos ocupados por los objetos han de rotar cíclicamente, llevando el primero a la segunda posición, el segundo a la tercera, y el tercero a la primera.



"MULTIPLICACION", OPERACION CLAVE

En la tabla de multiplicar correspondiente a las seis permutaciones de tres objetos vemos los 36 resultados de combinarlas por pares. La permutación "identidad" actúa como el número 1 en una tabla de multiplicación numérica ordinaria. Nótese que cada "producto" de la tabla es una de las seis permutaciones que figuran en los operandos (*recuadros blancos*). En todo grupo, la operación ha de ser, en este sentido, "cerrada".

		Segundo, efectúe esta permutación					
	∘ ("y después")	(1)	(1,2,3)	(1,3,2)	(1,2)	(1,3)	(2,3)
Primero, efectúe esta permutación	(1)	(1)	(1,2,3)	(1,3,2)	(1,2)	(1,3)	(2,3)
	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,3,2)	(1)	(2,3)	(1,2)	(1,3)
	(1,3,2)	(1,3,2)	(1)	(1,2,3)	(1,3)	(2,3)	(1,2)
	(1,2)	(1,2)	(1,3)	(2,3)	(1)	(1,2,3)	(1,3,2)
	(1,3)	(1,3)	(2,3)	(1,2)	(1,3,2)	(1)	(1,2,3)
	(2,3)	(2,3)	(1,2)	(1,3)	(1,2,3)	(1,3,2)	(1)

Lo que se haga en un subgrupo, en él permanece

Cada uno de los productos de las tres permutaciones del recuadro anaranjado de la tabla es igual a una de esas mismas tres permutaciones. Este cierre hace que las tres permutaciones cíclicas formen también un grupo contenido en S_3. Se dice en tales casos que el grupo menor es un subgrupo del grupo que lo contiene, en este caso S_3.

Siempre es posible deshacer

Para cada permutación de la columna izquierda de la tabla, uno de los productos que aparecen en su fila es (1), la identidad. La permutación que encabeza la misma columna que ése (1) se llama permutación inversa de la primera, pues restaura la ordenación de partida. Cada permutación *g* tiene una inversa, que se denota g^{-1}. Por ejemplo, la inversa de (1, 2, 3), que se denota $(1, 2, 3)^{-1}$, es (1, 3, 2), porque (1, 2, 3) ∘ (1, 3, 2) = (1); (1, 2) es inversa de sí misma, $(1, 2) = (1, 2)^{-1}$, pues, como indica la tabla, (1, 2) ∘ (1, 2) = (1).

ENSAMBLAJE

Un grupo simple es un grupo que carece de subgrupos "normales propios". Todo grupo tiene al menos dos subgrupos, a saber, él mismo y el subgrupo cuyo único elemento es (1); cualquier otro subgrupo que pueda existir será un subgrupo propio.

Entonces, ¿qué significa "normal"?

Tomemos en la tabla de multiplicar una permutación cualquiera, por ejemplo, la (1, 2), y multipliquémosla por una cualquiera de las del subgrupo de color naranja; por ejemplo, (1, 2, 3).

(1,2) ∘ (1,2,3) = (1,3)

Multipliquemos el resultado por la inversa de la primera permutación, que en este caso es la misma (1, 2):

(1,3) ∘ (1,2) = (1,3,2)

En breve: $(1,2) \circ (1,2,3) \circ (1,2)^{-1} = (1,3,2)$

Si el resultado de cada triple producto construido de esta manera pertenece al subgrupo, se dice que el subgrupo es normal. En este caso, el producto final (1, 3, 2) pertenece, en efecto, al subgrupo del recuadro naranja.

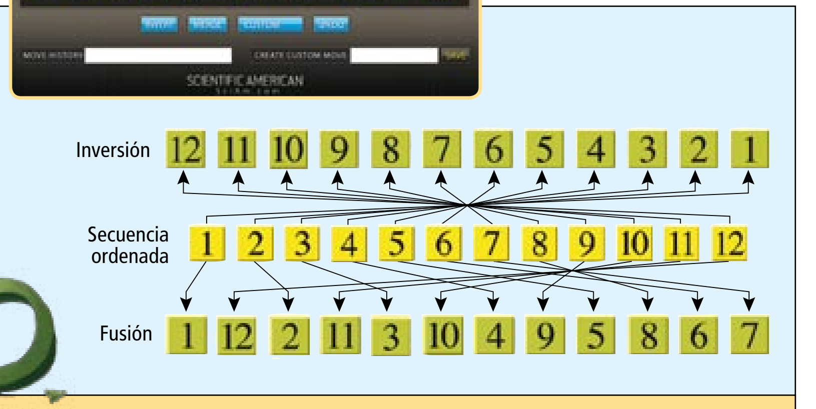
¿Qué significa "esporádico", pues?

Casi todos los grupos simples están clasificados en familias que constan de un número infinito de ejemplares. Pero quedaban fuera de la clasificación 26 grupos "ácratas", no pertenecientes a ninguna de dichas familias, y que tampoco tienen entre sí gran cosa en común. Los matemáticos, para evitar el término "misceláneos", los han llamado grupos esporádicos.

JOHNNY JOHNSON

EN INTERNET

Los autores han diseñado el rompecabezas de Mathieu M_{12}, que representa al grupo simple esporádico M_{12}, para jugarlo en Internet (se puede hacerlo en www.sciam.com/media/inline/2008-07/puzzles/m12.html). El rompecabezas comienza con una secuencia desordenada de números, del 1 a 12. El objetivo consiste en ordenarlos mediante combinaciones de dos tipos de movimiento solamente, que se ejecutan al pulsar un botón. En el diagrama se expone el efecto de cada movimiento sobre los números no desordenados.



M_{24}, un segundo rompecabezas de Mathieu, representa al grupo simple esporádico M_{24}. En el estado original aparecen los números de 1 a 23 dispuestos en círculo en el sentido de las agujas del reloj, y el 0 está situado fuera del círculo, justo a las 12. Al igual que con M_{12}, el objeto es restaurar la ordenación de partida desde un estado de desorden. También en M_{24} hay dos movimientos. Uno de ellos hace avanzar el círculo una "muesca", y envía el número de la posición 1 a la posición 2, el de posición 2 a la 3, y así sucesivamente. El número de la posición 23 es enviado a la posición 1. El número del exterior no se mueve. El segundo movimiento intercambia entre sí los pares de números que ocupan circulitos del mismo color. (Se puede jugarlo en http://www.sciam.com/media/inline/2008-07/puzzles/m24.html).

En cuanto al tercer juego creado por los autores, Dotto, visite **http://www.investigacionyciencia.es/productos.asp?producto=616** y marque "Grupos simples en juego".

Mathieu M_{24}. Al igual que M_{12}, el M_{24} es "pentatransitivo": mediante una combinación acertada de los dos movimientos, resulta posible manipular la configuración hasta que cinco cualesquiera de los 24 números se hallen situados en cualesquiera cinco de las 24 posiciones. A causa de la pentatransitividad, nuestra indicación para resolver el problema M_{12} ayuda a resolver también el M_{24}: se han de idear movimientos que devuelvan los números de 1 a 5 a sus posiciones debidas, sin perturbar a los que ya se encuentran en su lugar. Pero en este caso, para conseguir la solución hay que hacer algo más. El grupo M_{24} cuenta con $24 \times 23 \times 23 \times 22 \times 21 \times 20 \times 48 = 244.823.040$ elementos; así pues, incluso tras haber conseguido que los números de 1 a 5 hayan retornado a sus posiciones correctas, los otros 19 números pueden todavía distribuirse, de 48 formas diferentes, por el contorno del círculo.

Nuestro último rompecabezas, al que llamamos Dotto, representa al grupo de Conway Co_0, publicado en 1968 por John H. Conway, de la Universidad de Princeton. Co_0 contiene al grupo simple esporádico Co_1 y tiene exactamente el doble de elementos que Co_1. Conway es demasiado modesto para darle su nombre a Co_0, por lo que denota a su grupo ".0" (que en inglés se pronunciaría "dot-o").

Tanto Dotto como su grupo subyacente poseen fascinantes propiedades matemáticas. El rompecabezas guarda un cercano parentesco con el retículo de Leech, un conjunto de "puntos" del espacio de 24 dimensiones (cada punto está definido por una lista de 24 números, que serían sus "coordenadas" en ese espacio). Se sabe que en el espacio de 24 dimensiones, entre todos los empaquetamientos construidos mediante esferas de dimensión 24 centradas en los puntos de un retículo, el empaquetamiento más compacto es el retículo de Leech.

De monstruos y bebés

Cuatro grupos simples esporádicos superan en tamaño al Co_1: el grupo de Janko J_4, el grupo de Fischer $Fi_{24'}$, el Monstruo Bebé B y el gran Monstruo M. En coherencia con su nombre, el Monstruo es el mayor de todos y consta de unos 8×10^{53} elementos. Construido en 1980 por Robert L. Griess, Jr., de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, consiste en el grupo de transformaciones de cierta estructura matemática muy compleja, incrustada en el espacio de 196.884 dimensiones.

No hemos intentado la construcción de rompecabezas basados en otros grupos simples esporádicos, aunque seguramente sería posible. Desde luego, el diseño de un rompecabezas realizable prácticamente basado en el Monstruo constituiría una empresa matemática de altos vuelos. La razón es que se ignora si el Monstruo es el grupo de permutaciones de algún objeto lo suficientemente pequeño como para que se pueda visualizarlo, si bien, según una conjetura, sería el grupo de permutaciones de un cierto espacio curvo de 24 dimensiones. Un rompecabezas Monstruo acertadamente diseñado podría llevar a los matemáticos más cerca de la demostración de tan fascinante conjetura.



Bibliografía complementaria

POR ALGORITMO O POR TANTEO, CUBISTAS Y CUBOMAESTROS TENACES NO PARAN DE DARLE VUELTAS AL CUBO MAGICO. Douglas R. Hofstadter en Temas Metamágicos de *Investigación y Ciencia*, mayo de 1981.

EL TEOREMA ENORME. Daniel Gorenstein en *Investigación y Ciencia*, febrero de 1986.

SPHERE PACKING, LATTICES AND GROUPS. Tercera edición. John Horton Conwa y Neil J. A. Sloane. Springer Verlag, 1999.

FINITE GROUP THEORY. Segunda edición. M. Aschbacher. Cambridge University Press, 2000.

TWELVE SPORADIC GROUPS. Robert L. Griess, Jr. Springer Monographs in Mathematics, 2002.

RYAN REID

La CRISIS del agua

Peter Rogers

La demanda de agua aumenta y los recursos planetarios se vuelven impredecibles. Las técnicas actuales podrían impedir una crisis global del agua, pero hay que ponerlas en práctica pronto

CONCEPTOS BASICOS

- Los recursos hídricos globales están amenazados por una demanda de agua en aumento alimentada por sectores muy diversos. Las poblaciones crecientes necesitan cada vez más agua para beber, para la higiene y los saneamientos, para la producción de alimentos y para la industria. Se espera que el cambio climático agrave las sequías.
- Los gestores necesitan resolver la manera de suministrar agua sin degradar los ecosistemas naturales que la proporcionan.
- Métodos sencillos, ya existentes, pueden paliar la escasez. También cabe aumentar los recursos, por ejemplo con formas mejores de desalar agua.
- Pero los gobiernos han de empezar ya a poner en práctica políticas adecuadas y a invertir en infraestructuras para la conservación del agua.

Un amigo mío vive en un barrio de clase media de Nueva Delhi, una de las ciudades más ricas de la India. Aunque esa zona recibe una cantidad notable de lluvia cada año, mi amigo se despierta por la mañana con el estrépito de un megáfono que anuncia que sólo se podrá disponer de agua durante la hora siguiente. Se apresura a llenar la bañera y otros receptáculos para que le dure todo el día. Las restricciones endémicas de Nueva Delhi se producen en buena parte porque los gestores hidráulicos decidieron hace algunos años sacar de los ríos y embalses, aguas arriba de la ciudad, grandes caudales para el riego de los campos.

Mi hijo, que vive en la árida Phoenix, en Arizona, se levanta oyendo el sonido discreto y sibilante de los aspersores que riegan los verdes céspedes y los campos de golf de su urbanización. Aunque Phoenix está situada en medio del desierto de Sonora, disfruta de un suministro de agua prácticamente ilimitado. Allí, los gestores han permitido que el agua de regadío se desvíe de la agricultura a las ciudades y urbanizaciones, al tiempo que autorizan que las aguas negras recicladas se usen en los parques y en otras aplicaciones que no requieren agua potable.

Al igual que en Nueva Delhi y Phoenix, en el resto del mundo los responsables de la política del agua disfrutan de un gran poder en lo que se refiere a la gestión de los recursos hídricos. El uso prudente de ese poder se hará cada vez más importante a medida que pasen los años porque la demanda mundial de agua dulce está superando las cantidades disponibles en muchos lugares, una situación que no muestra síntoma alguno de remitir.

Que el problema sea bien conocido no lo hace menos preocupante: en la actualidad, una persona de cada seis, más de mil millones, padece de un acceso inadecuado al agua dulce segura. En 2025, según datos que han dado a conocer las Naciones Unidas, los recursos hídricos de más de la mitad de los países padecerán o bien estrés (por ejemplo, cuando se vaya demandando cada vez más agua de la que haya disponible o sea apta para el consumo) o bien escasez. A mediados del siglo, hasta tres cuartas partes de la población de la Tierra puede que tenga que enfrentarse a déficits de agua dulce.

Los científicos esperan que la escasez de agua se generalice debido, en buena medida, al incremento de la población mundial, al enriquecimiento (con el bienestar crece la demanda individual) y al cambio climático mundial, que está exacerbando la aridez y reduciendo la disponibilidad hídrica de muchas regiones. Más todavía: muchos recursos hídricos se encuentran amenazados por sistemas defectuosos de eliminación de residuos, la emisión

de contaminantes industriales, la escorrentía cargada de fertilizantes y la entrada de agua salada en los acuíferos costeros a medida que se consume agua freática.

Puesto que la falta de acceso al agua puede conducir al hambre, a enfermedades, a la inestabilidad política e incluso a conflictos armados, que no se emprendan acciones comportará graves consecuencias de largo alcance.

Afortunadamente, se conocen en muy buena medida los métodos de gestión y las técnicas que se requieren para ahorrar el agua existente y procurarse más. Comentaré algunas que parecen particularmente efectivas. Lo que ahora se necesita es acción. Gobiernos y autoridades han de formular y ejecutar planes concretos para poner en marcha las medidas políticas, económicas y técnicas que asegurarían la disponibilidad de agua en la actualidad y en los próximos decenios.

Orígenes de la escasez

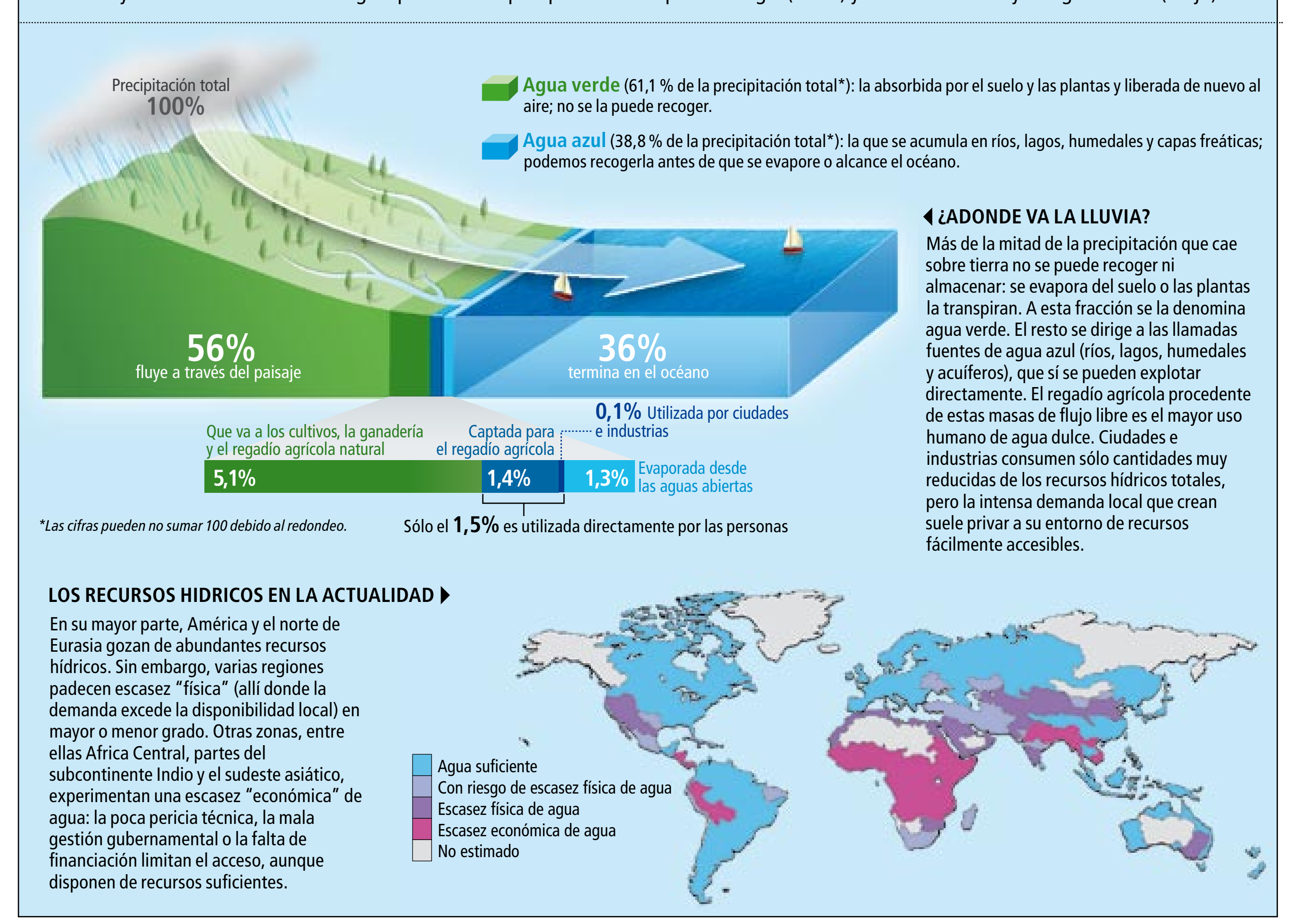
Resolver los problemas de agua del mundo requiere, para empezar, saber cuánta agua dulce necesita cada persona y cuáles son los factores que impiden el suministro y aumentan la demanda en las diferentes partes del mundo. Malin Falkenmark, del Instituto Internacional del Agua, de Estocolmo, y otros expertos estiman que, en promedio, cada persona necesita un mínimo de 1000 metros cúbicos de agua al año, equivalentes a dos quintas partes del volumen de una piscina olímpica, para beber, la higiene y producir los alimentos que necesita. El que la gente obtenga el agua suficiente depende en gran parte de dónde viva, porque



1. LOS RECURSOS HIDRICOS del mundo se exprimen a medida que la población crece y las rentas aumentan.

Muchísima agua, pero no siempre donde se la necesita

Ciento diez mil kilómetros cúbicos de precipitación, casi diez veces el volumen del lago Superior, cae del cielo a la superficie emergida de la Tierra cada año. Esta cantidad enorme bastaría para satisfacer sin apuros las necesidades de todos y cada uno de los habitantes del planeta si el agua llegara donde y cuando se la necesita. Pero gran parte de esta precipitación no se puede recoger (*arriba*) y el resto se distribuye irregularmente (*abajo*).



1000
metros cúbicos anuales

Cantidad mínima de agua que una persona necesita para beber, para su higiene y para producir alimentos. El volumen es equivalente a las dos quintas partes de una piscina olímpica.

la distribución de los recursos hídricos varía mucho.

Abastecer de agua adecuada constituye un reto imponente para los países más secos o en vías de desarrollo, con poblaciones grandes, porque en estas regiones la demanda es elevada y el suministro reducido. A ríos como el Nilo, el Jordán, el Yangtsé y el Ganges no sólo se les extrae demasiada agua, sino que se quedan casi en seco regularmente durante períodos extensos a lo largo del año. Y los niveles de los acuíferos subterráneos bajo Nueva Delhi, Pekín y otras muchas áreas urbanas florecientes están disminuyendo.

Mientras tanto, la escasez de agua se ha convertido en un fenómeno habitual en los países desarrollados. Graves sequías en los Estados Unidos, por ejemplo, han dejado recientemente a muchas ciudades y pueblos de la parte septentrional de Georgia y grandes franjas del sudoeste esforzándose por conseguir agua. Los pantanos Mead y Powell, a los que alimenta el río Colorado, sobreexplotado, son muestras emblemáticas del problema. Cada año, la reducción incesante del agua que embalsan queda de manifiesto con la sucesión de las marcas de yeso que los niveles más altos van dejando en las paredes del cañón.

Regla de oro

La localización no determina la disponibilidad de agua en un lugar dado. Cierto. Poder pagarla desempeña un papel importante. En el Oeste norteamericano existe un viejo refrán: "Aunque el agua suele correr monte abajo, subirá siempre monte arriba hacia el dinero". En otras palabras, cuando el abastecimiento es deficiente, las autoridades lo suelen desviar a actividades que generan mayores ingresos, a expensas de las que generan menos. Quien tiene dinero tendrá agua.

Tales disposiciones suelen dejar a las personas pobres y a los consumidores no humanos de agua (la flora y fauna de los ecosistemas

5W INFOGRAPHICS, FUENTE: INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE *WATER FOR FOOD, WATER FOR LIFE*, 2007 (*cuña paisaje océano*); LUCY READING-IKKANDA, FUENTE: INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE (*mapa*); 5W INFOGRAPHICS, FUENTE: MALIN FALKENMARK *Instituto Internacional del Agua de Estocolmo* (*cubo de agua*)

adyacentes) con asignaciones insuficientes. E incluso las mejores intenciones pueden resultar distorsionadas por las realidades económicas que describe el aforismo del Oeste.

Viene aquí a cuento lo que ocurrió en una de las cuencas hidrográficas mejor gestionadas del mundo, la cuenca del río Murray-Darling, en Australia sudoriental. Hace decenios, los agricultores y el gobierno dividieron allí las aguas entre los usuarios humanos (viticultores, cerealistas y ganaderos) con tino y basándose en la equidad y la economía. El acuerdo regional de gestión hídrica permitía que los participantes intercambiaran agua y derechos hídricos de mercado. Incluso reservaba una parte importante del recurso para los ecosistemas asociados y sus habitantes naturales, "usuarios" clave que con frecuencia se ignoran, aunque su salud es la base del bienestar de la región. Por ejemplo, las plantas acuáticas y de marisma, tanto las macroscópicas como las microscópicas, suelen hacer mucho por eliminar los residuos antropogénicos del agua que pasa por sus correspondientes ecosistemas.

Sin embargo, resultó que las cantidades de agua que los planificadores habían reservado para mantener el ambiente local eran inadecuadas (una subestimación que se hizo patente durante las sequías periódicas, en particular la que ha azotado la zona durante la última media docena de años). El territorio circundante de la cuenca del Murray-Darling se secó y últimamente ha sufrido incendios forestales.

Todos los actores económicos se habían llevado su parte de forma bastante razonable; simplemente, no consideraron las necesidades del ambiente natural, que sufrió mucho cuando un suministro ya inadecuado se redujo hasta niveles críticos por culpa de la sequía. Los miembros de la Comisión de la Cuenca del Murray-Darling buscan ahora una salida del embrollo y de los resultados desastrosos del cálculo erróneo de su asignación del recurso hídrico total.

Dadas las dificultades de repartir con equidad los recursos hídricos dentro de un solo país, imagínese el lector las complejidades de hacerlo en cuencas fluviales internacionales. Piense en la del río Jordán, que linda con Líbano, Siria, Israel, las zonas palestinas y Jordania, países todos que alegan derechos sobre el recurso compartido, pero limitado, en una región extremadamente árida. La pugna por el agua ha contribuido a las disputas civiles y militares de la zona. Sólo las negociaciones continuas y el compromiso han mantenido bajo control una situación tan tensa.

Determinar la demanda

Lo mismo que la oferta, la demanda de agua varía de un lugar a otro. La demanda no sólo aumenta con el tamaño de la población y su tasa de crecimiento. Tiende a crecer también con el nivel de renta: los grupos ricos consumen más agua, especialmente en áreas urbanas e industriales. Los pudientes exigen el tratamiento de aguas residuales y el regadío intensivo para la agricultura, entre otros servicios. En muchas ciudades, y en particular en los territorios densamente poblados de Asia y Africa, la demanda de agua está aumentando rápidamente.

Además de los niveles de renta, el precio del agua repercute en la demanda. A finales de los años noventa, cuando mis colaboradores y yo simulamos el uso mundial de agua desde el año 2000 hasta el 2050, encontramos que las necesidades de agua en todo el mundo aumentarían desde 3350 kilómetros cúbicos, aproximadamente el volumen del lago Hurón, hasta 4900 km^3 si la renta y los precios se mantenían como en 1998. (Un kilómetro

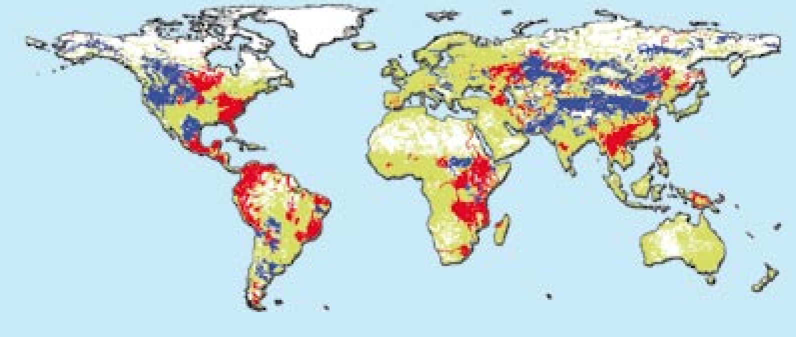
El autor

Peter Rogers ocupa la cátedra Gordon McKay de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Harvard, donde se doctoró en 1966. Es asesor del Consorcio Global del Agua, una organización dedicada a mejorar la gestión mundial del recurso; ha recibido financiación de las fundaciones Guggenheim y Siglo Veinte.

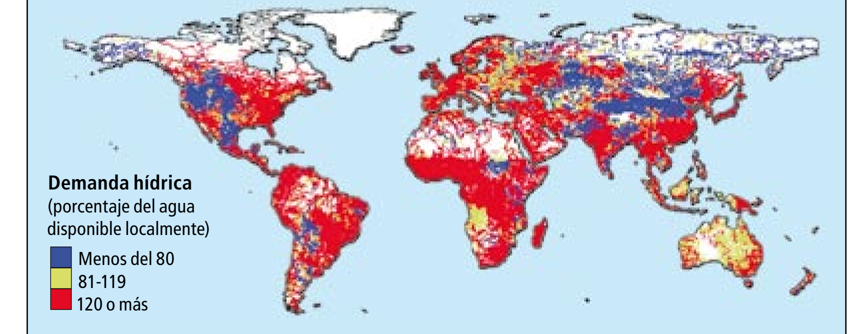
Presión climática y demográfica

Los modelos que examinan los efectos del cambio climático y del crecimiento demográfico y económico sobre la disponibilidad de agua en el año 2025 indican que el cambio climático, por sí solo, producirá escasez en muchos lugares (*arriba*). Con todo, más peligroso resulta el crecimiento demográfico. A falta de una acción concertada para ahorrar agua, la combinación de crecimiento demográfico y de cambio climático (*abajo*) producirá escasez generalizada.

EL CAMBIO CLIMATICO INFLUIRA SOBRE LA ESCASEZ...



...PERO EL CRECIMIENTO DEMOGRAFICO COMBINADO CON EL CAMBIO CLIMATICO PUEDE SER DEVASTADOR

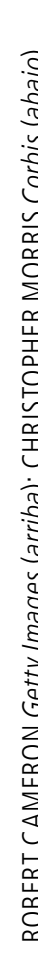


FUENTE: "GLOBAL WATER RESOURCES: VULNERABILITY FROM CLIMATE CHANGE AND POPULATION GROWTH", POR CHARLES J. VÖRÖSMARTY ET AL., EN *SCIENCE*, VOL. 289; 14 DE JULIO DE 2000





2. LA EXTRACCION DE AGUA del río Colorado para regar islas verdes en medio del desierto, como Las Vegas (*arriba*), se ha intensificado tanto, que hay manchas minerales blancas que señalan los máximos niveles del agua en las paredes del cañón inundado por el pantano Mead (*abajo*), el mayor embalse de los Estados Unidos.



En muy buena medida se conocen las técnicas y métodos de gestión que se requieren para ahorrar el agua existente y procurarse más. Lo que ahora se necesita es ACTUAR.

cúbico de agua es el volumen de 400.000 piscinas olímpicas.) Pero la demanda casi se triplicaría (hasta 9250 km³) si las rentas de los países más pobres seguían subiendo hasta niveles equivalentes a los actuales de los países de renta media y si los gobiernos de aquéllos no aplicaban ninguna política especial para restringir el uso de agua. Esta mayor demanda intensificaría muchísimo la presión sobre los recursos hídricos, resultado que concuerda bastante bien con los pronósticos que hizo el Instituto Internacional para la Gestión del Agua, en su estudio de 2007 *Agua para alimentos, agua para la vida,* en el caso de que "no se hiciese nada diferente".

Maneras de limitar el despilfarro

Ante la importancia de la economía y de la renta en los asuntos hídricos, vale la pena adoptar políticas razonables de precios que promuevan un mayor ahorro por los usuarios domésticos e industriales. En el pasado, el coste del agua en los EE.UU. y otras potencias económicas, demasiado bajo, no incentivaba el ahorro: como suele ocurrir cuando la gente explota un recurso natural, nadie se preocupa del despilfarro si un recurso, por barato, parece gratuito.

Por ello, establecer precios más altos para el agua allí donde sea posible figura en los primeros puestos de mi lista de recomendaciones. Tiene mucho sentido en los países desarrollados, en particular en ciudades grandes y áreas industriales, y cada vez más en los países en vías de desarrollo. Precios más elevados del agua pueden estimular la reutilización sistemática del agua (las llamadas aguas grises) para usos que no requieran potabilidad. También puede animar a los organismos responsables la construcción de sistemas de reciclado y de recuperación.

Aumentar los precios puede, además, convencer a los municipios y a otras instituciones de que reduzcan las pérdidas de agua mediante la mejora de los sistemas de distribución de agua. Una de las mayores consecuencias de poner un precio demasiado bajo al agua es que se generan fondos insuficientes para el desarrollo futuro y el mantenimiento preventivo. En 2002, la Oficina de Cuentas del gobierno de los EE.UU. informó de que muchos servicios públicos de aguas domésticas posponen el mantenimiento de las infraestructuras hidráulicas para no salirse de sus limitados presupuestos. En lugar de evitar averías importantes mediante la detección precoz de las fugas, esperan a que se rompan las tuberías para arreglarlas.

El coste de arreglar y modernizar las infraestructuras hidráulicas de los EE.UU. y Canadá para reducir pérdidas y asegurar su funcionamiento continuado será elevado. La consultora Booz Allen Hamilton ha estimado que los dos países necesitarán gastar conjuntamente 3,6 billones de dólares en sus sistemas hidráulicos a lo largo de los próximos 25 años.

Cuando se trata de ahorrar agua, se impone, según otra estrategia, centrarse en los mayores consumidores. Este enfoque coloca a la agricultura de regadío en el punto de mira: ningún ahorro sería tan impresionante como el que podría conseguirse en los flujos de irrigación. Para hacer frente a las necesidades alimentarias en 2050 sin ninguna mejora en los métodos de la agricultura de regadío, los campesinos necesitarían un aumento sustancial del suministro de agua para riego (pasar de los 2700 km³ actuales a 4000 km³), según

el estudio del Instituto Internacional para la Gestión del Agua.

En cambio, incluso un modesto aumento del 10 por ciento en la eficiencia del riego liberaría más agua de la que pierde el conjunto de los restantes usuarios por evaporación. Este objetivo podría conseguirse terminando con las fugas en las infraestructuras de conducción de agua y poniendo en práctica sistemas de almacenamiento de agua con pocas pérdidas, así como una aplicación más eficiente del agua al campo.

Un acuerdo entre los suministradores municipales de agua en California meridional y los regantes del distrito del valle Imperial ilustra un creativo esfuerzo por ahorrar. El grupo municipal paga por que se impermeabilicen los canales de riegos que sufren pérdidas; el agua que se ahorra así se destina a necesidades municipales.

Un enfoque adicional para ahorrar agua de riego implica canalizar agua, que terminará regando los campos, hasta depósitos subterráneos en la estación subsiguiente a la cosecha, cuando no crecen los cultivos. En la mayor parte del mundo, la acumulación de agua de lluvia y de nieve (y su escorrentía hasta los ríos) tiene su máximo en las estaciones del año sin crecimiento de cultivos, cuando la demanda para el agua de riego es más baja. Por ello, la tarea fundamental de los gestores estriba en transferir agua de la estación en la que hay una oferta elevada a la estación de demanda alta, cuando se necesita regar la siembra.

La solución más común es mantener el agua superficial represada en embalses hasta la estación de crecimiento, pero la exposición hace que gran parte de esta provisión se evapore. El almacenamiento subterráneo limitaría las pérdidas por evaporación. Para que dicho almacenamiento sea factible, se han de encontrar grandes depósitos subsuperficiales que puedan recargarse sin problemas mediante recursos superficiales y que puedan devolver fácilmente su contenido a la superficie cuando se los necesite para el regadío. Estos “bancos de agua” ya operan en Arizona, California y otras partes.

Un mayor uso del riego gota a gota, que minimiza el consumo al hacer que el agua vaya calando lentamente, ya sea desde la superficie del suelo o directamente junto a las raíces, haría asimismo mucho por reducir la demanda de agua para regadíos. La inversión en nuevas variedades de cultivos que puedan tolerar la sequía y bajos niveles de agua, así como aguas salobres e incluso saladas, puede ayudar a reducir las necesidades de agua de regadío.

Dado que la demanda de productos agrícolas crece a medida que las poblaciones y las rentas aumentan, es improbable que los gestores del agua puedan reducir de manera significativa la cantidad que en la actualidad se dedica a los regadíos. Pero las mejoras en la eficiencia del riego, así como del rendimiento de las plantas sembradas, pueden ayudar a mantener los aumentos en niveles razonables.

Más medidas que deben tomarse

Se podría mantener baja la demanda de agua para regadío en regiones áridas y semiáridas, al tiempo que se satisfacen las necesidades alimentarias futuras del mundo, si a esas regiones se les suministrase “agua virtual”. Con tal expresión se designa la cantidad de agua que se gasta en la producción de alimentos o de bienes comerciales. Si estos productos se

Conservar el agua de regadío

El riego del campo consume enormes cantidades de agua; reducir en un 10 por ciento el agua de regadío ahorraría más agua que la que usan los demás consumidores. Una reducción así es verosímil: habría que cerrar las fugas en el sistema de distribución de agua de regadío, transportar el agua bajo tierra para limitar la evaporación, aplicar métodos de riego gota a gota y modificar los cultivos para que toleren una menor humedad. En la imagen de abajo, el agua del río Colorado fluye por un canal que atraviesa los fértiles campos del valle Imperial, en California.



Encarecer el agua

El precio del agua, en los Estados Unidos y otras potencias económicas, ha sido tradicionalmente tan bajo, que los usuarios han tenido pocos incentivos para ahorrarla. Pocos se molestan en ahorrar una mercancía que se diría gratuita, pese a tratarse de un bien preciado. Con precios más altos se promovería el ahorro, así como la inversión en infraestructuras hidráulicas menos derrochadoras.

11 metros cúbicos

Es la cantidad de agua necesaria para producir un par de pantalones vaqueros. Equivale a la capacidad de un camión cisterna típico.



BOB ROWAN *Progressive Image/Corbis* (*canal*); SW INFOGRAPHICS (*grifo y camión*)

INVERSIONES HIDRAULICAS NECESARIAS POR REGION

2005-2030 (billones de euros)

5,8 Asia/Oceanía
3,2 Sudamérica y América Latina
2,9 Europa
2,3 EE.UU./Canadá
0,1 Africa
0,1 Oriente Medio

El mantenimiento de las infraestructuras hidráulicas es esencial para impedir el deterioro, las pérdidas y las roturas. Al mismo tiempo, el crecimiento de las poblaciones y del nivel de vida requiere sistemas de distribución de agua nuevos y eficientes. Para ayudar a conservar los recursos hídricos, los países desarrollados y algunos menos desarrollados tendrán que gastar a lo largo del próximo cuarto de siglo billones de euros en mantener y crear infraestructuras eficientes.

exportan a una región seca, entonces dicha región no tendrá que utilizar su propia agua para crearlos. De ahí que representen una transferencia de "agua virtual" a la localidad receptora.

El concepto de agua virtual parecerá a primera vista un mero artificio contable, pero la importación de bienes (y del contenido de agua virtual de dichos bienes) está ayudando a muchos países secos a no tener que usar sus propios recursos hídricos para cultivar, liberando así grandes cantidades para otras aplicaciones. El concepto de agua virtual y el crecimiento del comercio internacional han propiciado la resolución de muchas disputas entre países causadas por la escasez. Por citar una muestra, las importaciones de agua virtual en productos por parte de Jordania han reducido la probabilidad de que se enfrente por el agua con su vecina Israel.

Anualmente, la magnitud del comercio global en agua virtual supera los 800.000 millones de m^3 de agua, el equivalente a 10 Nilos. Liberalizar el comercio de productos agrícolas y reducir las restricciones tarifarias que ahora impiden el flujo de productos alimentarios mejoraría de forma significativa los flujos globales de agua virtual. Un comercio agrícola totalmente libre duplicaría el envío total anual de agua virtual, hasta más de 1,7 billones de m^3.

Cualesquiera que sean los beneficios que el mundo pueda obtener de las transferencias de agua virtual, los habitantes de unas ciudades en incesante crecimiento necesitan agua corriente para beber, para la higiene y el saneamiento. La demanda creciente de servicios de saneamiento urbanos, basados en el agua, se reduciría si se adoptasen dispositivos secos, o de uso reducido de agua, como los retretes de compostaje seco con sistemas de separación de orina, que desvían la orina para su reutilización en la agricultura y convierten las heces en un compost (humus artificial) que enriquecerá el suelo. Estas unidades, que funcionan de manera muy parecida a las pilas de compost de jardín, emplean microorganismos aerobios que descomponen los residuos humanos en una sustancia no tóxica y rica en nutrientes. Los agricultores pueden explotar la materia orgánica compostada resultante como fertilizante para las cosechas. Estas técnicas son seguras, incluso en asentamientos urbanos muy densos, como demuestran las instalaciones de las Viviendas Gebers, en las afueras de Estocolmo, y otros muchos proyectos piloto.

Con estas técnicas resultaría factible desconectar los sistemas de suministro de agua potable de los albañales. Este paso ahorraría cantidades grandes de agua dulce si se generalizase su uso. Además, gracias a los residuos reciclados se utilizarían menos fertilizantes derivados de combustibles fósiles.

Pero no basta con reducir la demanda de agua. El enfoque complementario, aumentar su oferta, será un componente esencial de la superación de las restricciones de agua. Alrededor del 3 por ciento del agua de la Tierra es dulce; el resto, salada. Pero hay mecanismos de desalación que permiten explotar esta enorme fuente de agua salada. El abaratamiento, reciente y sustancial, del procedimiento de desalación más eficiente (los sistemas de ósmosis inversa) significa que muchas ciudades costeras pueden disponer ahora de nuevos recursos de agua potable.

"Agua virtual"

El agua virtual es la cantidad de agua que se usa para producir alimentos u otros bienes y que, por lo tanto, queda incorporada al producto. Por ejemplo, producir un kilogramo de trigo cuesta unos 1000 litros de agua, de manera que cada kilogramo "contiene" dicha cantidad. Las exportaciones comerciales de trigo a un país árido significan que sus habitantes no tendrán que gastar agua en el cultivo de trigo, lo que reduce la presión en los recursos hídricos locales.



Saneamiento con poca agua

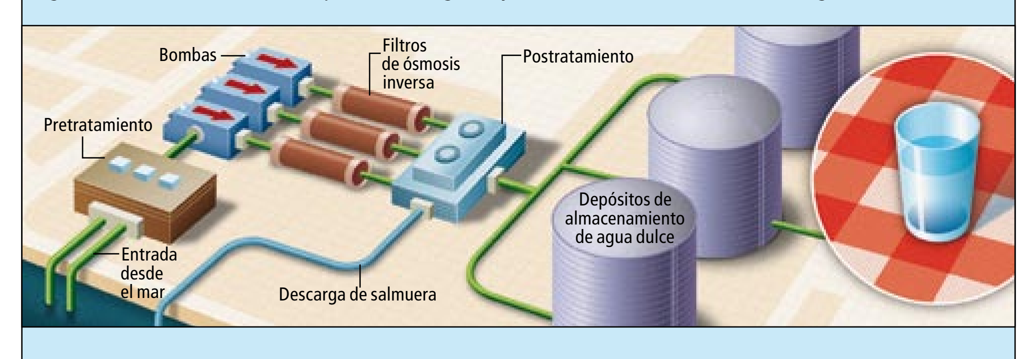
Los servicios de saneamiento gastan muchísima agua, unos 100 kilómetros cúbicos en todo el mundo. Los retretes que usan poca agua podrían suponer un gran ahorro. Los residentes de las Viviendas Gebers, en las afueras de Estocolmo, están probando un sistema que funciona como un compostador de jardín. El sistema separa los excrementos de la orina, que se utiliza como fertilizante líquido en agricultura; en un contenedor de compost, los microorganismos convierten los excrementos en fertilizante. Esta técnica resulta segura incluso en núcleos urbanos.



FUENTE: BOOZ ALLEN HAMILTON (*inversión de infraestructura*); 5W INFOGRAPHICS (*ilustraciones*)

La desalación avanzada

El noventa y siete por ciento del agua mundial es salada. Nuevas plantas desaladoras de bajo costo expandirían los recursos de agua dulce de las poblaciones costeras. Se aplica presión a agua salada (*izquierda*) , de manera que las moléculas de agua atraviesen una membrana selectora, lo que produce agua dulce en el otro lado (*derecha*). Aunque el proceso de filtrado suele consumir mucha energía, las membranas de la próxima generación, las técnicas de recuperación energética y otras innovaciones ahorrarían energía.



En la ósmosis inversa, el agua de mar fluye hacia la primera de dos cámaras separadas por una membrana semipermeable (que deja pasar el agua). La segunda cámara contiene agua dulce. Después, se aplica una presión considerable a la cámara que contiene la solución salina. Esa presión provoca que las moléculas de agua atraviesen la membrana hacia el lado del agua dulce.

Se han recortado costes gracias a varios avances; entre ellos, unas membranas refinadas que requieren menos presión y, por lo tanto, energía, para filtrar el agua, y haber logrado que el sistema sea modular, lo que facilita la construcción. Ya se están levantando grandes desaladoras dotadas de esta nueva técnica, más económica.

En la actualidad se trabaja en filtros de ósmosis inversa compuestos de nanotubos de carbono: alcanzan un rendimiento mayor en la separación y otro 30 % más de abaratamiento de la desalación. Esta técnica, exhibida ya en prototipos, está acercándose rápidamente al uso comercial. Sin embargo, a pesar de las mejoras en eficiencia energética, la aplicabilidad de la ósmosis inversa se encuentra condicionada por el hecho de que sigue siendo una consumidora excesiva de energía, de modo que su difusión requiere de que se disponga de energía asequible.

Réditos de la inversión

No sorprenderá que se diga que prevenir la escasez futura de agua implica gastar dinero... mucho dinero. Los analistas de Booz Allen Hamilton han estimado que para proporcionar hasta 2030 el agua necesaria para todos los usos, el mundo tendrá que gastar del orden de 650.000 millones de euros anuales en aplicar las técnicas ya existentes que ahorran agua, en conservar y sustituir infraestructuras y en construir saneamientos. Se trata de una cifra que intimida, no hay duda, pero quizá parezca menos abrumadora si la situamos en perspectiva. La suma necesaria resulta ser del orden del 1,5 por ciento del producto interior bruto mundial en un año, o alrededor de unos 80 euros per cápita. Parece factible.

Lamentablemente, la inversión en instalaciones hidráulicas, en porcentaje del producto interior bruto, se ha reducido a la mitad en la mayoría de los países desde finales de los años noventa. Si surge una crisis en los años por venir, no se deberá a falta de conocimientos, sino a la falta de previsión y a la renuencia en gastar el dinero necesario.

Pero hay al menos una razón para el optimismo: los países con mayor población y una necesidad ingente de infraestructuras hidráulicas (India y China) son precisamente los que están experimentando un crecimiento económico rápido. La parte del globo que tiene más probabilidades de continuar padeciendo acceso inadecuado al agua (Africa y sus mil millones de habitantes) es la que menos gasta en infraestructuras hidráulicas, y no puede permitirse gastar mucho. Por ello, es crucial que los países más ricos proporcionen más fondos.

La comunidad internacional puede reducir las probabilidades de una crisis mundial del agua si pone empeño en solucionar el problema. No hemos de inventar nuevas técnicas; simplemente, hemos de acelerar la adopción de las que ya existen para conservar y expandir las reservas de agua. Resolver el problema del agua no será fácil, pero podemos conseguirlo si empezamos ya y nos dedicamos en serio a ello. De otro modo, gran parte del mundo padecerá sed.

5W INFOGRAPHICS

AHORRO: GOTA A GOTA

Pequeñas cosas, pero constantes, mientras las haga un número suficiente de personas, pueden suponer un cambio notable en los problemas del mundo. He aquí algunas sugerencias.

- Use un compostador en lugar de un contenedor de residuos orgánicos.
- Haga funcionar su lavadora y lavaplatos (que han de ser eficientes energéticamente) sólo cuando estén completamente llenos.
- Instale un retrete de flujo dual (que usa menos agua para los desechos líquidos) o bien una unidad de flujo reducido y un sistema de reciclado de aguas grises.
- Utilice una alcachofa de ducha de flujo reducido y aproveche el agua del baño para regar las plantas.
- Riegue el césped a primera hora de la mañana o de noche para evitar las pérdidas por evaporación.

Bibliografía complementaria

BALANCING WATER FOR HUMANS AND NATURE: THE NEW APPROACH IN ECOHYDROLOGY. Malin Falkenmark y Johan Rockström. Earthscan, 2004.

WATER CRISIS: MYTH OR REALITY? Coordinado por Peter P. Rogers, M. Ramón Llamas y Luis Martínez-Cortina. Taylor & Francis, 2006.

THE WORLD'S WATER 2006-2007: THE BIENNIAL REPORT ON FRESHWATER RESOURCES. Peter H. Gleick et al. Island Press, 2006.

WATER FOR FOOD, WATER FOR LIFE: A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF WATER MANAGEMENT IN AGRICULTURE. Coordinado por David Molden. Earthscan (Londres) e International Water Management Institute (Colombo), 2007.

Rojo en medio del verde

Hugo Sarmento, Jean-Christophe Auguet, Marisol Felip y Josep M. Gasol

¿Qué charca tan rara es ésta que aparece en medio del Pirineo, a unos 2300 metros de altitud? No, no se trata de una imagen manipulada digitalmente. El color rojo intenso corresponde a la proliferación, en la superficie, de un microorganismo del género *Euglena*, que cobija un millar largo de especies. La que aquí nos concierne es *Euglena sanguinea*, epíteto que remite a su color rojo vivo. Debe la coloración al pigmento astaxanthina, carotenoide cuyo poder antioxidante protege a las células de la radiación solar, que es intensa en la superficie de la charca.

Las euglenas desafían la división, antaño tajante, entre planta y animal. Por un lado, poseen pigmentos (como la clorofila) que les permiten realizar la fotosíntesis; por otro, se desplazan mediante un flagelo, que les permite ingerir, por fagocitosis, bacterias y partículas de materia orgánica. Estos microorganismos habitan en aguas dulces, saladas e incluso en suelos. La mayoría prefieren medios ricos en materia orgánica. No es raro observar extensas proliferaciones de *Euglena* en zonas agrícolas con charcas llenas de excrementos de animales.

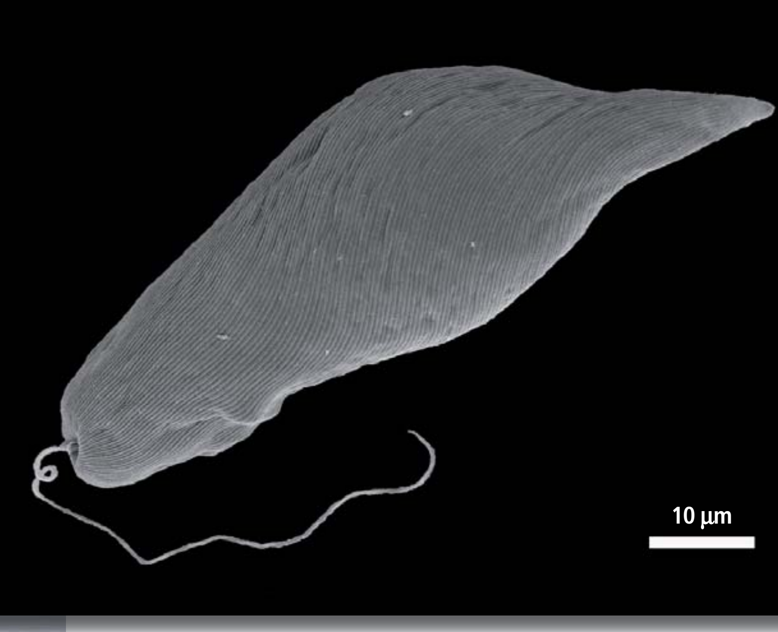


1. En medio del paisaje alpino pirenaico resalta una mancha roja. Se debe a la proliferación de microorganismos del género *Euglena*, que en verano se ve favorecida por los excrementos que deja el ganado.

Lago Pica Palomera
CHARCA ROJA
Lago Long de Liat

FOTOGRAFIAS DE LOS AUTORES; GOOGLE EARTH (*mapas*)





2. Microscopía óptica (*izquierda*) y electrónica de barrido (*derecha*) de microorganismos del género *Euglena*.

Ian Wilmut: Células madre

Como muchos precursores de la investigación en células madre, Ian Wilmut, el creador de la oveja Dolly, ha dado un nuevo enfoque a su trabajo. ¿Es el comienzo del fin de la clonación de embriones?

Sally Lehrman

Cuando Ian Wilmut, acompañado de sus colaboradores, presentó Dolly, la oveja clonada, en 1997, se disparó la investigación sobre células madre embrionarias, el público quedó asombrado y se desencadenó el pánico a que se clonasen seres humanos. "Dolly fue una gran sorpresa para todos", recuerda Thomas Zwala, del Centro Celular y Terapia Génica del Colegio Baylor de Medicina. Hasta ese momento, las ranas clonadas no habían crecido más allá del estadio de renacuajo; un anuncio parecido al de Dolly, aunque con un ratón, resultó ser una falsificación. Según la comunidad científica del momento, era imposible clonar mamíferos adultos con el método que empleó Wilmut.

Mientras Dolly iba creciendo, la técnica de clonación que la creó, la transferencia de núcleos de células somáticas (TNCS), se convirtió en un campo de investigación fértil. Se confió en que más tarde se podría colocar el núcleo de la célula de un paciente en un oocito humano sin fecundar, desprovisto de su propio núcleo, y recoger las células madre para el tratamiento de enfermedades incurables (parkinson, por ejemplo).

Sin embargo, el primer ensayo clínico en humanos queda lejos. El desafío técnico que supone la clonación de embriones, la cuestión ética y las limitaciones derivadas de la prohibición de costearla con fondos públicos en Estados Unidos lo impiden. A mediados de mayo, motivos de seguridad llevaron a la Administración de Alimentos y Fármacos de Estados Unidos a impedir que Geron, una empresa californiana, empezase unos ensayos clínicos en pacientes con lesiones agudas de médula espinal.

En estos momentos Wilmut, a sus 64 años, es uno de los científicos que, si bien en teoría siguen fieles a la TNCS, han abrazado en realidad un procedimiento distinto, cuya primera realización experimental se produjo en 2006. La acometió Shinya Yamanaka, de la Universidad de Kioto.



JEFF J. MITCHELL *Reuters/Corbis*

IAN WILMUT

CAMBIO DE POSICION: Este pionero de la transferencia de núcleos de células somáticas (TNCS), o clonación, la técnica que crea células madre embrionarias, se centra ahora en las células madres pluripotentes inducidas (células iPS).

SOLUCION HIBRIDA: Para resolver el problema de la escasez de oocitos, Wilmut propone introducir ADN humano en oocitos de animales. Hace poco se han aprobado estas uniones quiméricas en Inglaterra. En EE.UU. han dado lugar a un debate político y han obstaculizado el trabajo en la TNCS.

El mecanismo en cuestión lleva las células adultas a un estado similar al de las células embrionarias, o estado de pluripotencia, que les devuelve la capacidad de diferenciarse en cualquier tipo celular. Todo laboratorio bien equipado puede emplear la técnica, sencilla en comparación con la TNCS. "Es tan fácil, que se podría hacer en un laboratorio de instituto de bachillerato", dice Mahendra Rao, director del departamento de células madre y medicina regenerativa de Invitrogen.

El planteamiento de Yamanaka permite resolver el problema que supone la escasez de oocitos a los que puedan transferirse los núcleos y se libra de las objeciones morales contra la destrucción de embriones humanos. Más que la carencia de un valor científico inherente, son los aspectos prácticos los que motivan el abandono de la TNCS. Wilmut describe su propio cambio de dirección como una consecuencia del mucho tiempo que le llevan las responsabilidades que tiene como director del Centro Escocés para la Medicina Regenerativa, en Edimburgo. Aceptó este cargo el año pasado, tras casi treinta años en el cercano Instituto Roslin. Ahora, con veinte investigadores, el trabajo de Wilmut sobre esclerosis lateral amiotrófica se ha frenado. "Pensamos que sería mejor que las cosas se pudieran hacer más deprisa", señala Wilmut.

La transferencia de núcleos de células somáticas exige una gran destreza y un equipo costoso. Es fácil dañar el oocito sin fecundar y difícil conseguir que el núcleo del donante actúe concertadamente con su nuevo anfitrión. El primer éxito en primates se anunció el otoño pasado, en la Universidad de la Salud y la Ciencia de Oregón. Necesitaron, eso sí, 304 oocitos de 14 hembras de macaco rhesus, para obtener sólo dos líneas celulares; una de ellas tenía un cromosoma Y anormal. En humanos, la posibilidad de obtener oocitos nuevos también supone una limitación legal; la ley prohíbe cualquier pago a los donantes.

El logro de Yamanaka, convertir células adultas de ratón en células madre similares a las embrionarias, o células madre pluripotentes inducidas (células iPS), ha dado un nuevo impulso a la medicina regenerativa. En este proceso se utilizan ciertos virus que introducen de tres a cuatro genes en una célula adulta para reprogramarla, de modo que así vuelva a su estado no especializado, capaz de diferenciarse en cualquier tipo de célula somática. En el intervalo de unos meses, cuatro grupos de investigación, incluido el de Yamanaka, han publicado la obtención de iPs a partir de células de prepucio de neonato y de células de la epidermis y del tejido articular de adultos.

En la actualidad es difícil encontrar un laboratorio que se centre en la clonación embrionaria. Sin ir más lejos, Jamie Thomson, la primera en conseguir células viables de embriones humanos y de cultivarlas, dirige desde hace poco un instituto que se dedica sobre todo a las célula iPS. Aunque hasta ahora es ineficiente —menos del uno por ciento de las células llegan a ser pluripotentes—, se considera que el método de la iPS es una vía rápida para obtener células adecuadas para la investigación de enfermedades y, en última instancia, para la investigación clínica.

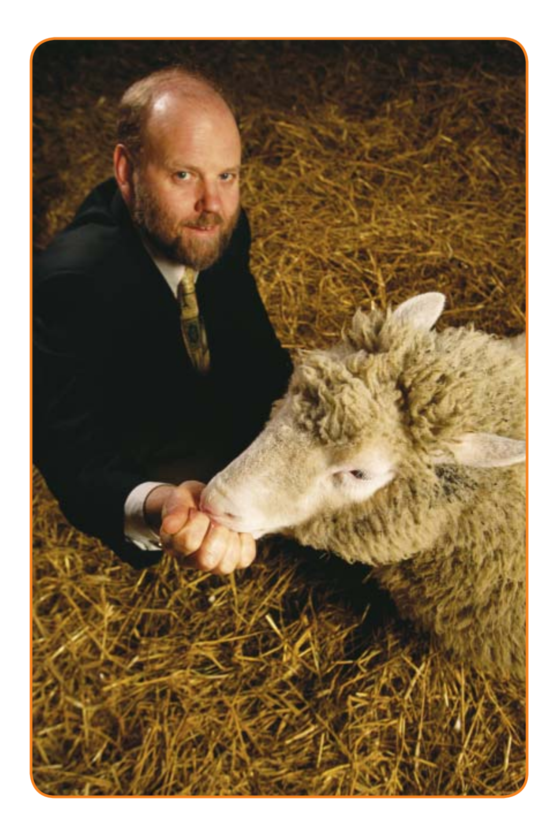
Con las iPS, el grupo de Wilmut puede estudiar líneas celulares en lugar de tener que luchar por obtenerlas. "Todo lo que hay que hacer es coger algunas células de la piel de una persona que ha heredado la enfermedad, derramar unos *polvos mágicos* sobre las células y esperar. A las tres semanas, ya se tienen células pluripotentes", explica Wilmut. En colaboración con George Daley, del Hospital Infantil de Boston, y Chris Shaw, del King's College de Londres, se valdrá de las células iPS para identificar mutaciones asociadas a la esclerosis lateral amiotrófica.

El método aún no promete curas rápidas. Para investigar la esclerosis lateral amiotrófica, hay que acelerar el desarrollo de la enfermedad y cocultivar los diferentes tipos celulares que intervienen en la enfermedad. Sería mejor evitar la utilización de vectores retrovirales, ya que introducen los genes de forma aleatoria en el cromosoma. Además, los nuevos genes podrían diferir en su nivel de actividad, funcionar de manera inesperada o influir de manera negativa en otros genes. Algunos grupos han logrado hacer células iPS sin el gen inductor de tumores que utilizó Yamanaka, pero consiguen muchas menos células iPS.

No se sabe a ciencia cierta cómo funciona la reprogramación de las iPS: los genes insertados podrían constituir un circuito regulador central o podrían activar otros genes. Se ignora si hay o no diferencias sutiles entre las iPS y las células madre embrionarias. Nunca se han cultivado los dos tipos de células en paralelo para su comparación posterior; tampoco se sabe la tasa de supervivencia tras la trasplantación de ninguno de los dos.

En opinión de Zwaka, en cuyo laboratorio se estudian las características de las células madres embrionarias, las células iPS quizá lleven a descartar ideas hasta ahora aceptadas acerca de lo que significa ser una célula diferenciada. Quizá, sugiere, no haya que conducir a una célula embrionaria a través de cada paso del desarrollo para crear un tipo de célula concreta. Puede haber un grupo de "reguladores principales", indica, que permitan a una célula epidérmica devenir una neurona adulta, sin pasar por el estadio embrionario.

Aunque se haya subido al tren de las iPS, Wilmut se declara partidario de la investigación con células madres embrionarias. La TNCS ha enseñado mucho sobre los fundamentos de la biología y va a continuar facilitando los estudios de programación y reprogramación celular aparte del genoma. Tan sólo las células embrionarias pueden responder las preguntas sobre la fertilidad y las primeras fases del desarrollo humano. Es probable que se cuente también con TNCS para producir modelos de enfermedades en mamíferos, como la fibrosis quística, y en aplicaciones agrarias, como la producción de proteínas humanas en la leche animal.



ROBERT WALLIS *Corbis*

ADIOS, DOLLY: Ian Wilmut, que inauguró una época al crear en 1997 la oveja más famosa del mundo, apoya la clonación, a pesar de que ha abandonado esta área de investigación.

En opinión de Daley, presidente de Sociedad Internacional para la Investigación de Células Madre, "está claro que es demasiado pronto para situar un método por encima del otro". Su laboratorio utiliza tanto TNCS como iPS para entender la pluripotencialidad. Daley teme que la opinión publica se pueda volver contra el trabajo en embriones y destruya las esperanzas de que un nuevo gobierno de los Estados Unidos abra oportunidades a la clonación de nuevas líneas celulares para la investigación.

Así, quienes se oponen a la investigación con células embrionarias han aprovechado que los científicos dirijan su atención a otro procedimiento para insistir en que "no hay ninguna razón válida para cualquier tipo de clonación humana" o destrucción de embriones. Es difícil escapar a la sensación de que el interés en la investigación de la TNCS está disminuyendo. Las objeciones éticas persisten, lo mismo que la escasez de oocitos. Si las iPS son un éxito, Wilmut predice que la transferencia nuclear encaminada a producir líneas celulares puede llegar a ser un día sólo una lección de historia.

Causas de la migraña

Los biólogos están desentrañando los misterios médicos de la migraña, desde la formación del aura hasta el dolor

David W. Dodick y J. Jay Gargus

CONCEPTOS BASICOS

- La migraña es más que un simple dolor de cabeza. Especialmente insidiosa, presenta varias fases.
- Solía considerarse un trastorno vascular, pero la investigación reciente ha demostrado que se trata de un problema neurológico relacionado con una onda de actividad neuronal que se propaga a través del cerebro.
- El origen de la migraña puede deberse a una disfunción del tronco encefálico.
- Aunque persiste el debate sobre las causas de la migraña, los últimos hallazgos abren nuevas vías terapéuticas.

Para los más de 300 millones de personas que padecen migrañas, el dolor palpitante y atroz que caracteriza a estas debilitantes jaquecas no precisa descripción. Para quienes no la sufren, la experiencia análoga más parecida podría ser el mal de altura grave: náuseas, fotofobia (sensibilidad a la luz) y un intenso dolor de cabeza que obliga a guardar cama. "El que nadie se muera a causa de la migraña resulta, para quien esté en medio de un ataque, una dudosa bendición", escribió Joan Didion en 1979 en su ensayo *In bed* ("En la cama"), perteneciente a la colección *The White Album*.

Los registros históricos sugieren que esta enfermedad viene conviviendo con nosotros desde hace, al menos, 7000 años. Sin embargo, sigue siendo uno de los trastornos médicos menos conocidos, peor diagnosticados y tratados de la forma menos adecuada. De hecho, muchas personas ni siquiera intentan buscar un tratamiento médico para su agonía, probablemente porque están convencidas de que los médicos poco pueden hacer para aliviarles, si no se muestran escépticos y hostiles. Didion escribió *In bed* hace casi tres décadas, pero algunos médicos siguen manifestándose hoy tan indiferentes como entonces: "No tenía ningún tumor cerebral, ni tensión ocular, ni hipertensión ni nada malo en absoluto; tenía, sencillamente, dolores de cabeza provocados por la migraña. Y los dolores de cabeza provocados por la migraña eran, como sabían todos los que no la sufrían, imaginarios".

Por fin, la migraña está empezando a recibir la atención que merece. Parte de ese interés nace de estudios epidemiológicos que ponen de manifiesto la elevada prevalencia de estos dolores de cabeza y el deterioro que suponen para quien los sufre. Un informe de la Organización Mundial de la Salud describió la migraña como uno de los cuatro trastornos médicos crónicos que más merman nuestras facultades. La preocupación aumenta si tenemos en cuenta los gastos que supone; estas jaquecas y sus secuelas cuestan a la economía estadounidense 17.000 millones de dólares en horas de trabajo perdidas, prestaciones por bajas laborales y gastos de atención sanitaria.

Pero la mayor parte del creciente interés por la migraña se debe a los recientes descubrimientos en genética, a la obtención de imágenes cerebrales y a la biología molecular. Aunque la naturaleza de tales hallazgos es de muy diversa índole, parecen converger y reforzarse entre sí; por eso los investigadores confían en poder ahondar en las causas de la migraña y desarrollar terapias para prevenirla o frenarla en seco.

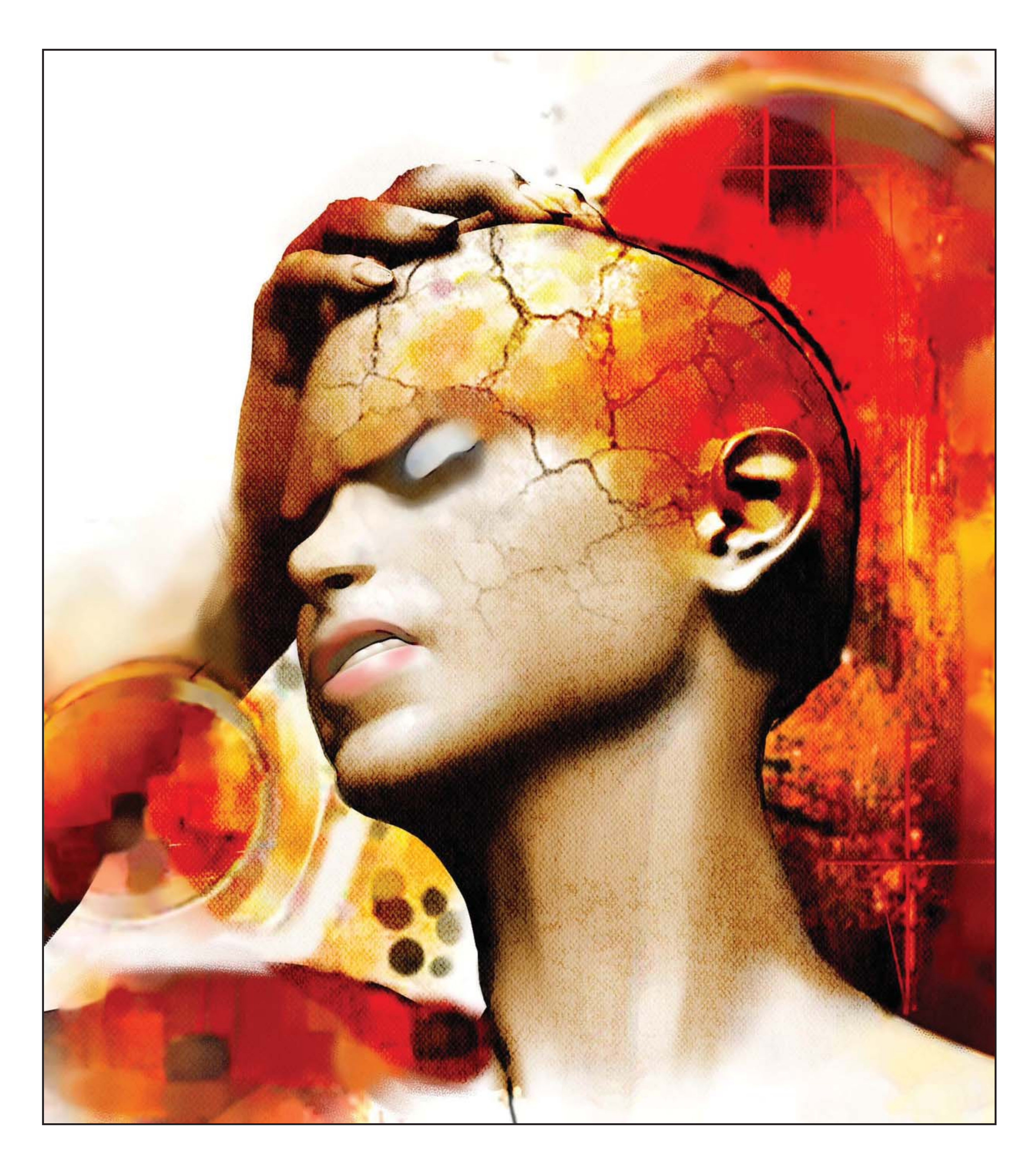
El ascenso de los humores

Cualquier teoría sobre la migraña debe dar cuenta de un haz de síntomas muy dispares. La frecuencia, la duración, las sensaciones que se experimentan y los factores desencadenantes presentan una amplia gama de diversidad. Quienes la padecen tienen, por término medio, uno o dos ataques al mes, que duran todo el día. El 10 por ciento los sufren cada semana; el 20 por ciento, cada dos o tres días, y hasta un 14 por ciento, más de 15 días al mes. El dolor suele atacar sólo a uno de los lados de la cabeza, aunque no siempre. En las personas propensas, la migraña se desencadena a través de una serie de agentes tan diferentes, que parece casi imposible evitarla: el alcohol, la deshidratación, el esfuerzo físico, la menstruación, el estrés emocional, los cambios de tiempo, los cambios estacionales, las alergias, la falta de sueño, el hambre, la altitud y las luces fluorescentes, entre otros. Las migrañas se dan en todas las edades y en ambos sexos, aunque las mujeres de entre 15 y 55 años las padecen de una forma desproporcionada: dos tercios de los casos se dan en este grupo de la población.

A lo largo de los años, los médicos han apuntado numerosas causas posibles. En la Grecia de la antigüedad clásica, Galeno los atribuyó al ascenso de los vapores, o humores, desde el hígado hasta la cabeza. La propia descripción que expuso Galeno de la hemicrania (enfermedad dolorosa que afecta, aproximadamente, a la mitad de la cabeza) corresponde a nuestra visión actual de la migraña. El término "hemicrania" acabó convirtiéndose en "migraña".

En el siglo XVII, el flujo sanguíneo reemplazó a los humores como responsable de la migraña. Salvo contadas excepciones, la hipótesis vascular dominó hasta el decenio de los ochenta del siglo pasado. La idea aceptada, basada en las

DETROIT FREE PRESS/MCT/LANDOV



observaciones e inferencias de Harold G. Wolff, del Hospital Presbiteriano de Nueva York, y otros médicos era que el dolor de la migraña surgía de la dilatación y el estiramiento de los vasos sanguíneos cerebrales, que provocaba la excitación de las neuronas generadoras de las señales del dolor. Wolff pensaba que el dolor de cabeza venía precedido por una caída de la presión sanguínea, ocasionada por la constricción de los vasos.

Observaciones recientes, mediante escáneres cerebrales, han modificado nuestra forma de entender los cambios vasculares. En múltiples ocasiones, el dolor no viene precedido de una disminución del flujo sanguíneo sino de un *aumento* (que puede llegar a ser de un 300 por ciento). Sin embargo, durante la jaqueca no se produce un aumento del flujo sanguíneo; de hecho, la circulación parece normal o, si acaso, reducida.

LAS CUATRO FASES DE LA MIGRAÑA

A diferencia de la mayoría de los dolores de cabeza, la migraña presenta varias fases, aunque no todos los que la padecen las recorren, un aspecto éste desconcertante de la enfermedad.

Porcentaje de pacientes que sufren cada fase	
60 %	**PRODROMO** **SINTOMAS:** Dificultad para concentrarse, bostezos, fatiga y sensibilidad a luz y el ruido. **DURACION:** Entre pocas horas y pocos días.
30 %	**AURA** **SINTOMAS:** Ilusiones visuales con destellos y luces, frecuentemente seguidas de ceguera o manchas oscuras con la misma configuración que las alucinaciones brillantes iniciales. **DURACION:** Entre 20 y 60 minutos.
100 %	**DOLOR DE CABEZA** **SINTOMAS:** Dolores atroces acompañados de sensibilidad a la luz y el sonido, náuseas y vómitos. Algunas veces el dolor afecta a la mitad de la cabeza. **DURACION:** Entre 4 y 72 horas.
70 %	**POSTDROMO** **SINTOMAS:** Persiste la sensibilidad a la luz y el movimiento, también hay somnolencia, fatiga y dificultad para enfocar; algunos pacientes la describen como la fase "zombi". **DURACION:** Entre pocas horas y pocos días.

Tales hallazgos han arrojado luz sobre el origen de la migraña. Según la hipótesis vigente, la migraña es consecuencia de un trastorno del sistema nervioso, probablemente, de su parte más ancestral: el tronco encefálico.

El origen del aura

Esta nueva teoría se funda en el estudio de dos aspectos de la migraña: el aura, que precede al dolor de cabeza en el 30 por ciento de quienes la padecen, y la propia jaqueca. El término "aura" viene utilizándose desde hace casi dos milenios para describir las alucinaciones sensoriales que se tienen justo antes de algunos ataques epilépticos. Durante un siglo ha venido designando la aparición de numerosas migrañas. (La epilepsia puede darse en gente con migraña y viceversa; se desconocen las razones.)

La forma habitual del aura corresponde a una ilusión visual de estrellas brillantes, chispazos, destellos de luz, rayos o patrones geométricos que a menudo van seguidos de manchas oscuras que conservan la misma forma que la imagen brillante original. En algunas personas, el aura incluye una sensación de cosquilleo, debilidad o ambas, en uno de los lados del cuerpo, así como dificultad para hablar. Con frecuencia, el aura precede al dolor de cabeza, pero puede declararse después de haber comenzado éste y persistir mientras dura.

El aura parece surgir de la depresión cortical propagada (una especie de "tormenta cerebral", que ya en el siglo XIX Edward Lieving propuso como causa de la migraña). Aunque el primero que describió el fenómeno en animales fue Arístides Leão en 1944, hasta hace poco no se le relacionó experimentalmente con la migraña. La depresión cortical propagada corresponde a una onda de intensa actividad de las neuronas que se propaga a través de una franja notable de la corteza cerebral, sobre todo en las regiones que controlan la visión. Esa fase de hiperexcitabilidad va seguida de una onda de inhibición neuronal extensa y prolongada. Durante la fase inhibidora, las neuronas se hallan en un estado de "animación suspendida", sin que entonces puedan ser excitadas.

La actividad neuronal está controlada mediante un flujo cuidadosamente sincronizado de iones de sodio, potasio y calcio a través de la membrana de las células nerviosas por medio de canales y bombas. Las bombas mantienen a las células en reposo con una elevada concentración de potasio y con concentraciones reducidas de sodio y calcio. Una neurona se excita (libera neurotransmisores), cuando el flujo de sodio y calcio hacia el interior de la célula a través de canales abiertos despolariza la membrana (aumenta la carga positiva del interior de la célula en relación con el exterior). A continuación, las células se hiperpolarizan brevemente: aumenta la carga negativa interior respecto de la exterior porque se permite una salida rápida de iones potasio. La hiperpolarización cierra los canales de sodio y calcio, y hace que las neuronas vuelvan a su estado de reposo poco después de haberse excitado. Tras haber recibido estimulaciones tan intensas, las neuronas permanecen hiperpolarizadas en exceso, o inhibidas, durante largo tiempo.

Las fases de hiperexcitabilidad seguidas de inhibición que caracterizan a la depresión cortical propagada explican los cambios en el flujo sanguíneo que, tal y como se ha venido documentando, tienen lugar antes de un ataque de migraña. Cuando las neuronas se encuentran activas y excitadas, necesitan una importante cantidad de energía y, por tanto, de sangre (justo lo que se observa en los escáneres cerebrales de pacientes que están experimentando el aura). Después, durante la inhibición, las neuronas apaciguadas necesitan menos aporte sanguíneo.

Otras observaciones respaldan la idea de que la depresión cortical propagada constituye el origen del aura. Mediante técnicas avanzadas de obtención de imágenes se ha demostrado que el momento en que aparece la onda de despolarización coincide con la descripción del aura. La onda eléctrica se desplaza a través de la corteza a una velocidad de dos o tres milímetros por minuto; las ilusiones visuales que acompañan al aura son exactamente las que se producirían a partir de una excitación que se propagase a través

VARIABILIDAD

Las víctimas experimentan ataques de distinta duración y frecuencia. La mayoría padece migrañas uno o dos días al mes. El 10 por ciento las tiene semanalmente; hasta un 14 por ciento las sufren durante más de 15 días cada mes. Dos tercios de los 300 millones de personas que en todo el mundo padecen migraña son mujeres de entre 15 y 55 años, lo que permite inculpar al estrógeno.

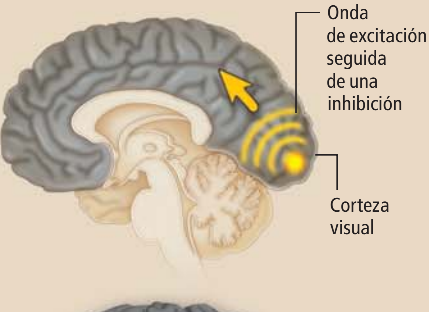


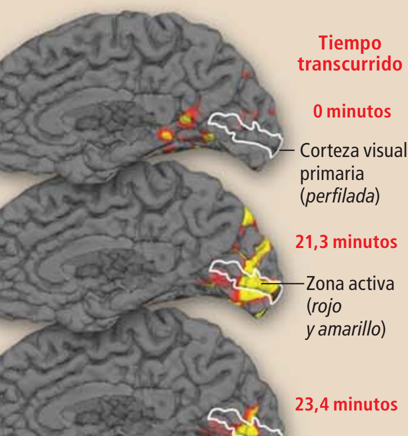
SUSAN MADDEN

TORMENTA CEREBRAL

El aura surge a raíz de una depresión cortical propagada: una onda de señalización excesiva se propaga a través de una amplia superficie del cerebro, seguida de un silencio anormal en las regiones, hiperactivadas con anterioridad. La propagación cursa por la corteza a una velocidad de dos o tres milímetros por minuto; recientemente se ha observado mediante técnicas de formación de imágenes cerebrales.

Corteza (materia gris)





TAMI TOLPA (*ilustraciones del cerebro*); CORTESIA DE NOUCHINE HADJIKHANI (*escáneres cerebrales*); MIGRAINE ACTION ASSOCIATION Y BOEHRINGER INGELHEIM (*pintura sobre el aura*)

de las regiones corticales a esa velocidad. La gama de sensaciones que abarca el aura (visuales, sensoriales y motoras) sugieren que las regiones correspondientes de la corteza resultan afectadas de manera secuencial, conforme "la tormenta" las va atravesando. Las manchas oscuras que ven los pacientes tras las alucinaciones brillantes concuerdan con la inhibición neuronal que tiene lugar en las regiones de la corteza visual que acaban de experimentar la hiperexcitabilidad.

Los estudios genéticos han aportado una pista sobre la razón de que la depresión cortical propagada la sufran personas que padecen migrañas. Se cree que la migraña corresponde a un trastorno poligenético complejo y frecuente, lo mismo que la diabetes, el cáncer, el autismo, la hipertensión y otros. Se trata de patologías que se presentan en el seno de una familia. Los gemelos idénticos tienen muchas más probabilidades de compartir las migrañas que los mellizos, lo que indica la presencia de un importante componente genético. Pero la enfermedad no se debe a una mutación genética individual; antes bien, parece que la probabilidad de sufrir migraña aumenta al heredar mutaciones en varios genes, cada uno de los cuales aporta una pequeña contribución. Operan también componentes no genéticos, puesto que incluso los gemelos idénticos desarrollan un comportamiento "discordante" en relación a la enfermedad: un gemelo sufre migraña y el otro no.

Se desconoce todavía qué genes incrementan la probabilidad de sufrir migraña y su aura en la población. Sin embargo, los estudios realizados en personas afectadas por una extraña variante de la enfermedad, la migraña hemipléjica familiar, indican que, en estos pacientes, el aura y la jaqueca se deben a defectos en las bombas y canales iónicos neuronales. Se han hallado tres genes con

Los autores

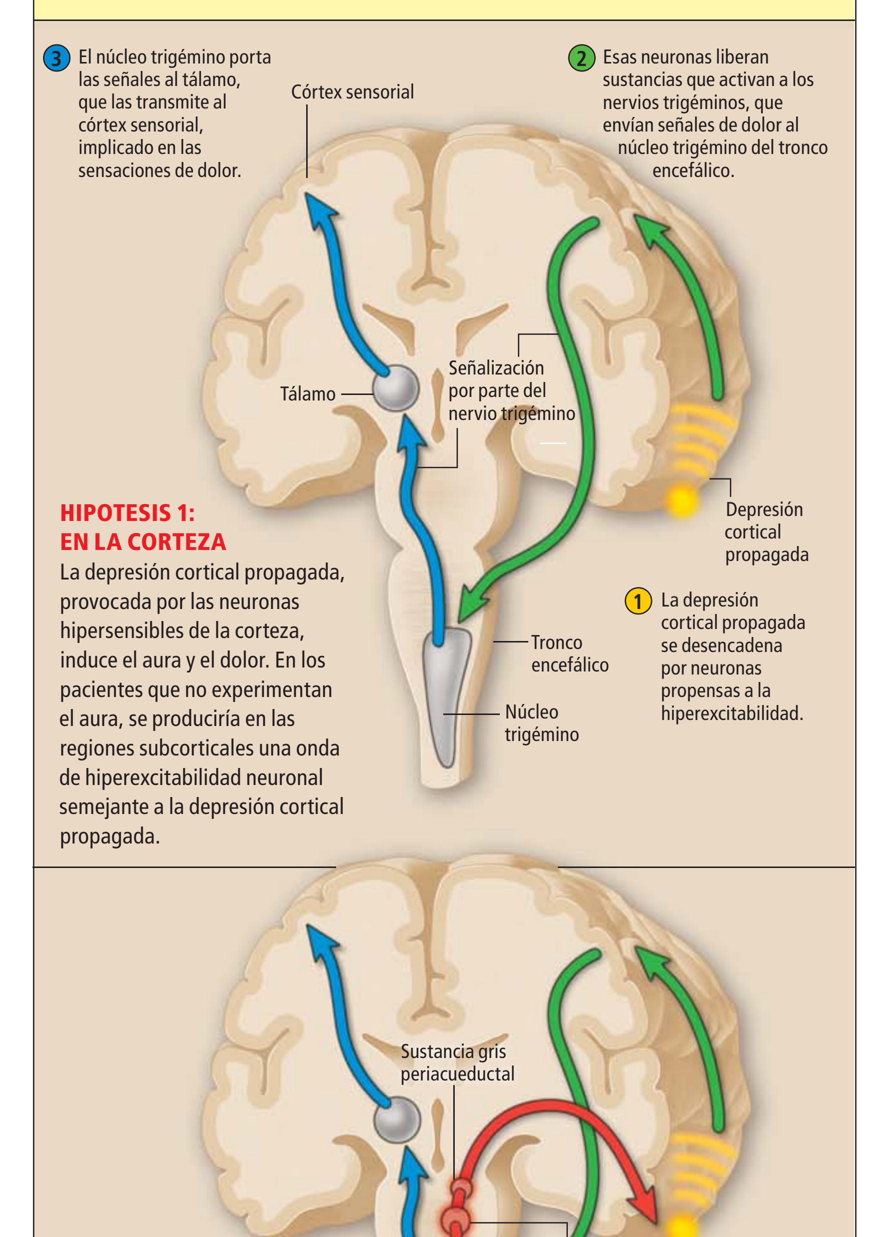
David W. Dodick, profesor de neurología en la Clínica Mayo en Arizona, investiga las anomalías del sistema nervioso central que subyacen bajo la migraña y otras formas de jaqueca. **J. Jay Gargus** da clases de fisiología, biofísica y genética humana en la Universidad de California en Irvine. Centra su trabajo en los fundamentos genéticos de la migraña y otras canalopatías.



1. LAS AURAS adoptan formas diversas. Muchos pacientes han elaborado representaciones artísticas de las alucinaciones. La que aquí se muestra resalta el brillo y la aspereza que se experimenta.

¿DONDE SE ORIGINA EL DOLOR?

Se debate si el dolor de cabeza comienza en el tronco encefálico, en la corteza o en la subcorteza.



HIPOTESIS 1: EN LA CORTEZA

La depresión cortical propagada, provocada por las neuronas hipersensibles de la corteza, induce el aura y el dolor. En los pacientes que no experimentan el aura, se produciría en las regiones subcorticales una onda de hiperexcitabilidad neuronal semejante a la depresión cortical propagada.

HIPOTESIS 2: EN EL TRONCO ENCEFALICO

Catalizan el dolor células nerviosas hipersensibles o aberrantes de los tres núcleos del tronco encefálico.

TAMI TOLPA

mutaciones que, de forma individual, son lo suficientemente potentes como para provocar la enfermedad (los tres genes codifican bombas y canales iónicos neuronales). Y no sólo eso. Esas mutaciones incrementan la excitabilidad de las células nerviosas, presumiblemente mediante una alteración de las propiedades de las bombas y canales iónicos que codifican. Tales descubrimientos avalan la hipótesis de que la migraña constituya una canalopatía, una enfermedad debida a una disfunción de los sistemas transportadores de iones, en el mismo sentido que la arritmia cardiaca y los ataques de apoplejía, entre otras.

No está claro si la disfunción de las bombas y canales iónicos constituye el único mecanismo de formación del aura. Se ignora si las formas más frecuentes de migraña implican perturbaciones en los tres genes involucrados en la migraña hemipléjica familiar. Pero los avances genéticos siguen resultando apasionantes. Sugieren que existe una relación entre la depresión cortical propagada y la disfunción de los canales iónicos, una relación crucial para el diseño de fármacos.

Del aura al dolor

Al propio tiempo que han ahondado en la relación entre el aura y la depresión cortical propagada, los investigadores han estado sondeando el origen del dolor de la migraña (la jaqueca que sufren los que experimentan el aura y los que no). El origen inmediato del dolor resulta obvio. La mayoría de las regiones del cerebro no detectan o no transmiten las señales del dolor. Pero sí lo hace el sistema nervioso trigémino, cuyas neuronas transmiten las señales de dolor desde las membranas que rodean el cerebro (meninges) y desde los vasos sanguíneos que irrigan dichas membranas.

El dolor, transmitido a través del sistema nervioso trigémino hacia el núcleo trigémino (en el tronco encefálico), puede, desde allí, alcanzar, vía hipotálamo, el córtex sensorial, que se halla implicado en nuestra percepción del dolor y de otras sensaciones. Sin embargo, en el caso de la migraña, se debate qué es lo primero que activa los nervios trigéminos. Se barajan dos hipótesis.

Unos sostienen que la depresión cortical propagada estimula directamente los nervios trigéminos. A medida que la onda de hiperexcitabilidad cursa a través de la corteza, provoca la liberación de neurotransmisores (glutamato y óxido nítrico) y iones. Esas moléculas operan a modo de mensajeros que inducen a los nervios trigéminos a transmitir las señales de dolor. En animales, se ha observado que la depresión cortical propagada activa así los nervios trigéminos.

La ruta hacia el dolor explicaría incluso lo que ocurre en los pacientes que no experimentan el aura. En el marco de la teoría en cuestión, la depresión cortical propagada podría acontecer en regiones de la corteza cuya activación no produce síntomas externos anteriores a la aparición del dolor. O, en ciertas personas, la depresión propagada podría ocurrir en regiones subcorticales y estimular los nervios trigéminos. En ese caso, aunque quizá los pacientes no experimentaran el aura, la fisiología básica sería la misma que en los individuos que sí la experimentan. En animales de laboratorio, podemos inducir en las regiones subcorticales la depresión propagada.

Además, los cambios en el flujo sanguíneo cerebral que reflejan las fases de excitación cortical y posterior inhibición en las personas que padecen migrañas con aura se han observado también en personas que experimentan migrañas sin aura; los pacientes muestran un aumento reseñable del flujo sanguíneo seguido de un flujo normal o reducido. Una observación que plantea la posibilidad de que la depresión cortical propagada resulte fundamental para la migraña, si bien sólo en algunos casos produce síntomas visuales que caracterizan al aura. El proceso generaría, por contra, síntomas menos obvios (fatiga o problemas de concentración). La observación de marras podría explicar también por qué muchas de las personas que experimentan el aura sufren, en algunas ocasiones, ataques sin ella.

La otra hipótesis sobre la activación de los nervios trigéminos sitúa el origen de la jaqueca en el tronco encefálico, no en la depresión cortical o subcortical propagada. Por el tallo cerebral pasa, en un sentido o en otro, la información entre el organismo y el cerebro. Esa estructura constituye también el lugar donde se alojan los centros de control para los estados de alerta, la percepción de la luz y los ruidos, el flujo sanguíneo cerebral, la respiración, los ciclos de vigilia-sueño, las funciones cardiovasculares y la sensibilidad ante el dolor.

La tomografía de emisión de positrones ha puesto de manifiesto la excitación de tres agrupaciones de células (núcleos) del tronco encefálico (el locus coeruleus, el núcleo del rafe y la sustancia gris periacueductal), durante la migraña y después. Según esta hipótesis, la actividad anormal de los núcleos mencionados podría inducir el dolor, por dos vías.

Los núcleos suelen inhibir a las neuronas trigéminas que se alojan en el interior del núcleo trigémino, mediante el envío continuo de un mensaje que dice “no os excitéis”. La disfunción de los núcleos alteraría ese mecanismo inhibidor, de modo que las neuronas trigéminas se excitarían aun cuando las meninges no estuvieran enviando señales de dolor. De ser así, el núcleo trigémino transmitiría mensajes de dolor al córtex sensorial sin haber recibido señales de dolor procedentes de las meninges o de los vasos sanguíneos. Los tres núcleos podrían también desencadenar la depresión propagada.

Los expertos han apuntado que, si hubiese que alterar una parte del tronco encefálico para provocar otros síntomas de la migraña, incluida el aura, el lugar idóneo serían los tres núcleos. Una de sus funciones principales consiste en controlar el flujo de información sensorial que llega al córtex sensorial (la luz, el ruido, el olor y el dolor, por ejemplo). La disfunción ocasional de estas agrupaciones celulares explicaría, por tanto, por qué las personas que padecen migraña experimentan sensibilidad a la luz, el sonido y los olores.

Además, la actividad de esas células depende del estado emocional y del comportamiento del individuo, factores que desencadenan migrañas. Las regiones del tronco encefálico indicadas reciben información de dos áreas de la corteza: el sistema límbico y el sistema paralímbico, regiones que regulan el deseo sexual, la atención y el estado de ánimo. A través de su conexión con el tronco encefálico, el sistema límbico incide en el funcionamiento del resto de la corteza. Ahí podría hallarse la explicación de la participación del estrés emocional y el estrés fisiológico en la catálisis de las migrañas, las fluctuaciones del estado de ánimo durante la migraña y la relación entre la migraña y trastornos como la depresión y la ansiedad, dos enfermedades que aparecen

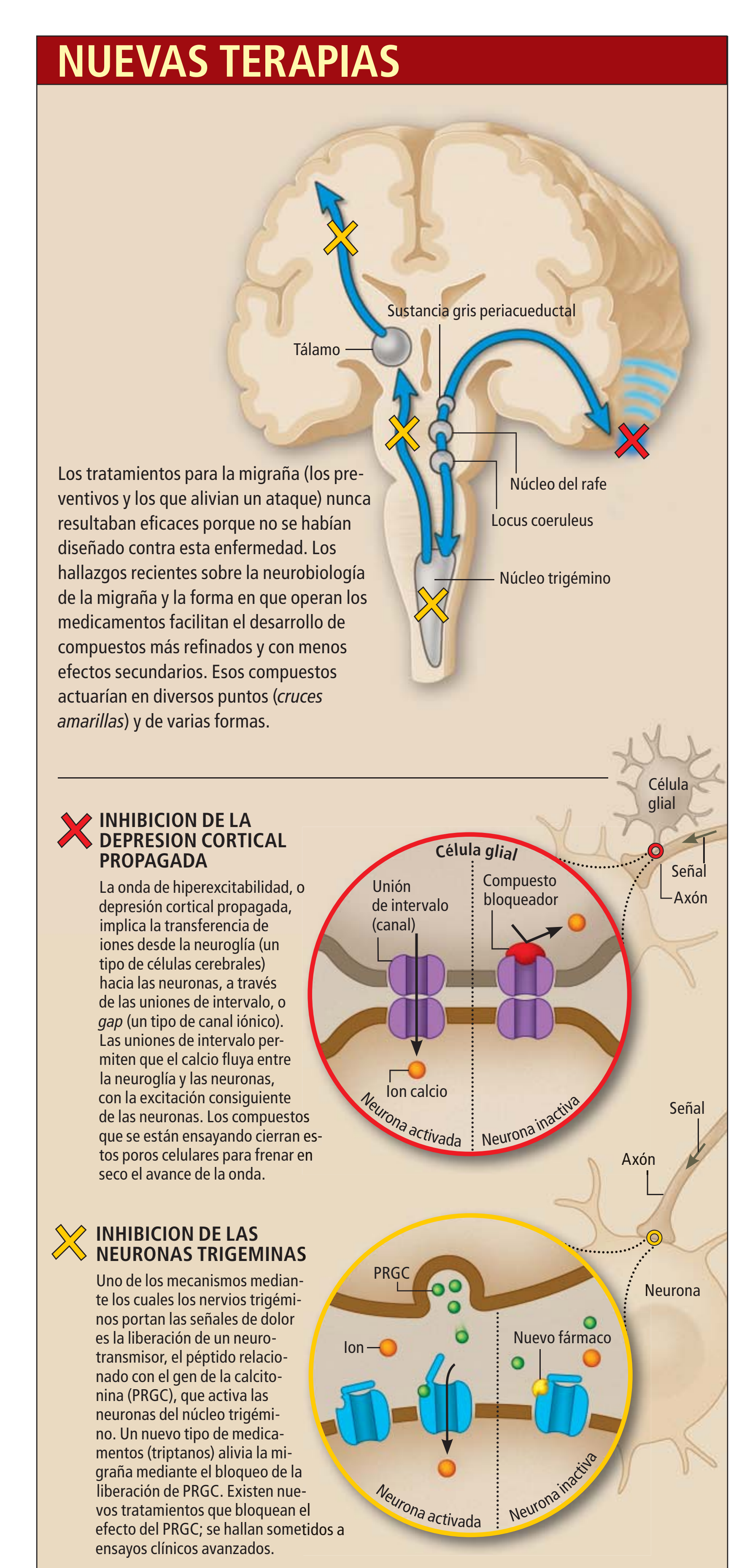


2. LA MIGRAÑA no es una enfermedad nueva. El códice *Scivias*, del siglo XII, muestra una visión descrita por la teóloga y abadesa Hildegard de Bingen. Podría tratarse de una de las primeras representaciones de un aura.

CATALIZADORES

Varios factores favorecen la aparición de un ataque de migraña: el alcohol, ciertos perfumes, la deshidratación, el ejercicio, la menstruación, el estrés, cambios de tiempo, cambios estacionales, alergias, falta de sueño, la altitud, las luces parpadeantes y el hambre.

ERICH LESSING *Art Resource, NY*



Los tratamientos para la migraña (los preventivos y los que alivian un ataque) nunca resultaban eficaces porque no se habían diseñado contra esta enfermedad. Los hallazgos recientes sobre la neurobiología de la migraña y la forma en que operan los medicamentos facilitan el desarrollo de compuestos más refinados y con menos efectos secundarios. Esos compuestos actuarían en diversos puntos (*cruces amarillas*) y de varias formas.

INHIBICION DE LA DEPRESION CORTICAL PROPAGADA

La onda de hiperexcitabilidad, o depresión cortical propagada, implica la transferencia de iones desde la neuroglía (un tipo de células cerebrales) hacia las neuronas, a través de las uniones de intervalo, o *gap* (un tipo de canal iónico). Las uniones de intervalo permiten que el calcio fluya entre la neuroglía y las neuronas, con la excitación consiguiente de las neuronas. Los compuestos que se están ensayando cierran estos poros celulares para frenar en seco el avance de la onda.

INHIBICION DE LAS NEURONAS TRIGEMINAS

Uno de los mecanismos mediante los cuales los nervios trigéminos portan las señales de dolor es la liberación de un neurotransmisor, el péptido relacionado con el gen de la calcitonina (PRGC), que activa las neuronas del núcleo trigémino. Un nuevo tipo de medicamentos (triptanos) alivia la migraña mediante el bloqueo de la liberación de PRGC. Existen nuevos tratamientos que bloquean el efecto del PRGC; se hallan sometidos a ensayos clínicos avanzados.

TAMI TOLPA (*arriba*); JEN CHRISTIANSEN (*abajo*)

con mayor frecuencia entre quienes padecen migraña que entre los individuos exentos.

Por último, la actividad espontánea y apaciguadora de las neuronas del núcleo del rafe —fundamental para la regulación de las rutas del dolor, los ritmos circadianos y los ciclos de vigilia-sueño— depende del perfecto funcionamiento de los canales iónicos de las neuronas de esa región, así como de la liberación, por parte de las neuronas, de noradrenalina y serotonina en otras regiones cerebrales. Esa neurotransmisión quizá corresponda a un mecanismo ancestral que resulta alterado durante la migraña. Los experimentos sobre el nemátodo *Caenorhabditis elegans* han demostrado la existencia de dos genes muy parecidos a los que aparecen mutados en la migraña hemipléjica familiar, genes que corresponden a reguladores de la liberación de serotonina. De tal observación se desprende que las mutaciones en los canales iónicos podrían provocar una disfunción de estas regiones del tronco encefálico y quizá, como resultado, una hiperexcitabilidad de las áreas corticales sobre las que ejercen su influencia.

Y llegamos a la cuestión crucial: ¿procede de la hiperexcitabilidad intrínseca de las neuronas corticales el dolor o se debe a un fallo en la actividad del tronco encefálico? La hiperexcitabilidad desemboca en depresión cortical propagada, activación de las fibras trigéminas del dolor en las meninges y dolor característico de la migraña. El fallo en la actividad del tronco encefálico insta, de forma indirecta, la activación espontánea de las neuronas trigéminas, facilita la depresión cortical propagada o ambas cosas a la vez.

Para algunos investigadores, este último escenario resulta más convincente porque el control crucial que ejerce el tronco encefálico sobre tantos aspectos de nuestra experiencia explicaría la diversidad de síntomas de la migraña.

Lo que depara el futuro

Por ahora, sólo unos pocos medicamentos previenen la migraña. Todos ellos fueron desarrollados para otras enfermedades (hipertensión, depresión y epilepsia). Al no ser específicos para la migraña, no sorprende que resulten eficaces sólo en el 50 por ciento de los pacientes (y, en éstos, únicamente durante el 50 por ciento del tiempo) y que induzcan efectos secundarios, algunos potencialmente peligrosos.

Las investigaciones recientes sobre el mecanismo de los fármacos contra la hipertensión, la epilepsia y la depresión han demostrado que uno de sus efectos consiste en inhibir la depresión cortical propagada. La capacidad de los fármacos para evitar la migraña con y sin aura respalda, por tanto, la hipótesis que

defiende que la depresión cortical propagada interviene en ambos tipos de ataques. A partir de esa observación, se han desarrollado nuevos medicamentos que inhiben de forma específica la depresión cortical propagada; se están ensayando en personas que padecen migrañas con y sin aura. Su acción consiste en evitar la apertura de las uniones de intervalo, *gap* (un tipo de canal iónico); interrumpen el flujo de calcio entre las células cerebrales.

Los medicamentos que se prescriben para paliar un ataque de migraña (triptanos) han resultado tan problemáticos como los que se utilizan con fines preventivos. Los triptanos contraen los vasos del organismo, incluidas las arterias coronarias, lo que limita seriamente su administración. Se desarrollaron partiendo de la idea equivocada de que la dilatación de los vasos sanguíneos era la causante del dolor y que, para aliviarlo, hacía falta, por consiguiente, una vasoconstricción.

Sabemos ahora que los triptanos alivian la migraña al inhibir la descarga neuronal trigémina (la liberación de mensajeros, en concreto el péptido relacionado con el gen de la calcitonina, por parte de los nervios trigéminos, que envían señales al núcleo trigémino).La inhibición bloquea la comunicación entre los nervios trigéminos y el entramado de neuronas que se encargan de transmitir el dolor en el tronco encefálico. Cabe también que los triptanos eviten esa comunicación actuando sobre el tálamo y la sustancia gris periacueductal.

Esos avances en el conocimiento de la función de los triptanos han abierto nuevas vías para el desarrollo de fármacos, algunos de ellos centrados en el péptido relacionado con el gen de la calcitonina. Se están realizando ensayos clínicos con varios medicamentos que bloquean la actividad de tales neurotransmisores causantes de dolor; parece que no provocan contracción arterial. Asimismo, se están diseñando terapias dirigidas contra el glutamato y el óxido nítrico, otros neurotransmisores trigéminos; se proponen interrumpir la comunicación entre los nervios trigéminos que estimulan las meninges y el núcleo trigémino del tronco encefálico. Serán los primeros compuestos diseñados específicamente para combatir ataques de migraña mediante la acción sobre las neuronas y sin provocar vasoconstricción.

Asimismo, se han explorado vías no farmacológicas. En particular, un dispositivo portátil que transmite breves pulsos de estimulación magnética para tratar la migraña con y sin aura. La técnica en cuestión (EMT, de estimulación magnética transcraneal) puede interrumpir la depresión cortical propagada y, probablemente, evitar que aparezca o aumente el dolor.

Para millones de personas, esos pasos perfilan un avance sustancial, no sólo porque suponen un alivio del dolor sino también porque contribuyen a cambiar las actitudes hacia este trastorno. Por fin, científicos y médicos están empezando a reconocer la complejidad de la migraña y sus efectos debilitantes. La enfermedad ha dejado de considerarse “imaginaria”.

3. CHARLES LUTWIDGE DODGSON (Lewis Carroll), autor de *Alicia en el país de las maravillas*, padecía migrañas. Hay quien sostiene que las transformaciones físicas de Alicia se basan en la propia experiencia de Dodgson, ya que la sensación de cambios de tamaño (micropsia o macropsia) ha sido descrita por muchas personas que sufren migrañas.

CHRISTI'ES IMAGES/CORBIS

Bases genéticas

En los últimos años, se han identificado varias mutaciones génicas responsables de la migraña hemipléjica familiar, una forma de migraña hereditaria y poco frecuente. Aunque los estudios genéticos se encuentran todavía en fase preliminar, ha quedado claro que esas mutaciones alteran el complejo funcionamiento de las bombas y canales iónicos que regulan la actividad de las neuronas. Multitud de expertos han terminado por convencerse de que incluso las formas más frecuentes de migraña se deben a una actividad anómala de las células nerviosas y no a alteraciones del flujo sanguíneo cerebral. Una conclusión que se ve reforzada por un nuevo descubrimiento: tres “genes de la migraña” contienen mutaciones que provocan epilepsia, una enfermedad hereditaria bajo la que subyace una disfunción de los canales iónicos. Ese tipo de trastornos debidos a perturbaciones en los sistemas transportadores de iones se denominan canalopatías. Los genes involucrados en migraña hemipléjica familiar son:

- *CACNA1A*: codifica una de las principales proteínas que forman parte de canal neuronal para el calcio, el canal P/Q.
- *ATP1A2*: codifica una proteína que bombea iones sodio y potasio a través de las membranas de las neuronas para crear el gradiente iónico que utilizan los canales de iones.
- *SCN1A*: da lugar a un canal neuronal para el sodio. Es el que se ha descubierto en fecha más reciente.

Bibliografía complementaria

MIGRAINE. Oliver Sacks. Vintage, 1999.

MIGRAINE — NEW MOLECULAR MECHANISMS. Daniela Pietrobon en *Neuroscientist*, vol. 11, n.º 4, págs. 373-386; 2005.

RECEPTOR, TRANSPORTER, AND ION CHANNEL DISEASES. J. Jay Gargus en *Encyclopedia of Molecular Cell Biology and Molecular Medicine*. Dirigido por Robert A. Myers. Wiley, 2005.

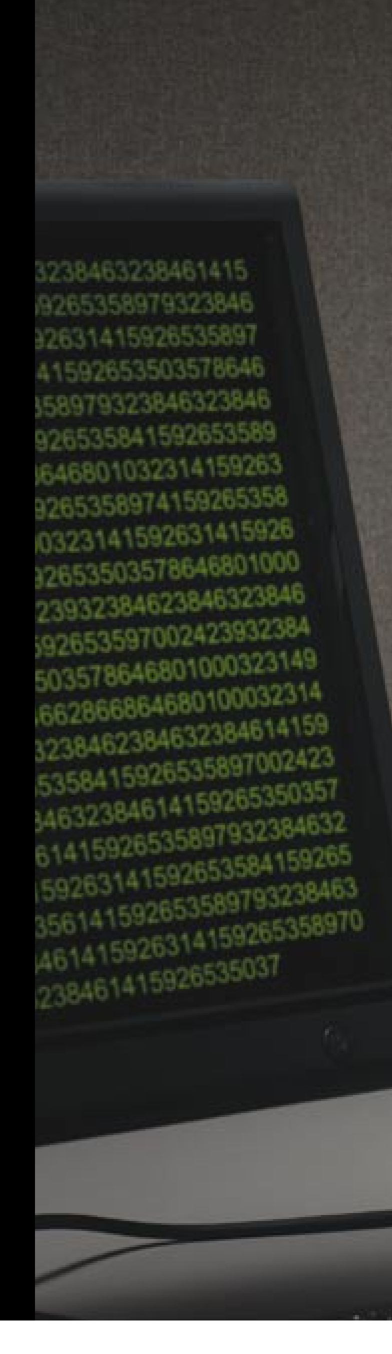
CHRONIC DAILY HEADACHE. David W. Dodick en *New England Journal of Medicine*, vol. 354, n.º 2, págs.158-165; 12 de enero, 2006.

RECENT ADVANCES IN UNDERSTANDING MIGRAINE MECHANISMS, MOLECULES AND THERAPEUTICS. Peter J. Goadsby en *Trends in Molecular Medicine*, vol. 13, n.º 1, págs. 39-44; enero, 2007.

COMPUTACION CUANTICA CON IONES

Se están dando los primeros pasos para construir computadoras de potencia gigantesca que calculen con átomos

Christopher R. Monroe y David J. Wineland



CONCEPTOS BASICOS

- Las computadoras cuánticas pueden almacenar y procesar datos por medio de átomos, fotones o microestructuras fabricadas. La máquina podrá algún día llevar a cabo tareas computacionales que se creía imposibles.
- La manipulación de iones atrapados está en la vanguardia del empeño por llegar a la computación cuántica. Se pueden almacenar datos en los iones y transferir información de un ion a otro.
- No se ven obstáculos fundamentales que impidan la construcción de computadoras de iones atrapados.

En los últimos decenios, los avances técnicos han mejorado muchísimo la velocidad y la fiabilidad de los ordenadores. Los chips actuales empaquetan casi mil millones de transistores en unos pocos centímetros cuadrados de silicio; en el futuro empequeñecerán aún más, hasta medir no mucho más que una molécula. A partir de ahí, los ordenadores diferirían de los actuales: su funcionamiento se regiría por la mecánica cuántica. Las computadoras cuánticas podrían llevar a cabo una serie de tareas cruciales mucho más deprisa que los ordenadores establecidos.

Tal vez la más conocida es la factorización de un número grande que sea el producto de dos números primos. Multiplicar dos números primos es un trabajo simple para las computadoras, aun cuando los números tengan una longitud de cientos de dígitos, pero el proceso inverso —deducir los factores primos— es tan difícil, que se ha convertido en la base de casi todas las formas de cifrado de datos en uso, sea para el comercio por Internet o para la transmisión de secretos de estado. En 1994 Peter Shor, entonces en los Laboratorios Bell, demostró que un ordenador cuántico desentrañaría los códigos de cifrado sin dificultad porque factorizaría los números exponencialmente más deprisa que un algoritmo clásico. Y en 1997 K. Lov Grover, también de los Laboratorios Bell, mostró que un ordenador cuántico buscaría mucho más velozmente un nombre en una base de datos sin clasificar en un listín de teléfonos cuando se dispone sólo del número.

La construcción de un ordenador cuántico, sin embargo, no será fácil. El correspondiente medio cuántico —los átomos, fotones o microestructuras fabricadas que almacenen los datos en bits cuánticos, en *qubits*— ha de satisfacer requisitos contrapuestos. Los qubits deben estar aislados de su entorno, para evitar



1. **LAS COMPUTADORAS DE IONES ATRAPADOS codificarían y procesarían datos con cadenas de iones que actúan, en cierta medida, como las bolas metálicas suspendidas del dispositivo de la figura. Los iones interactúan a través de movimientos oscilatorios. Se pueden manipular las partículas dirigiendo sobre ellas haces láser.**

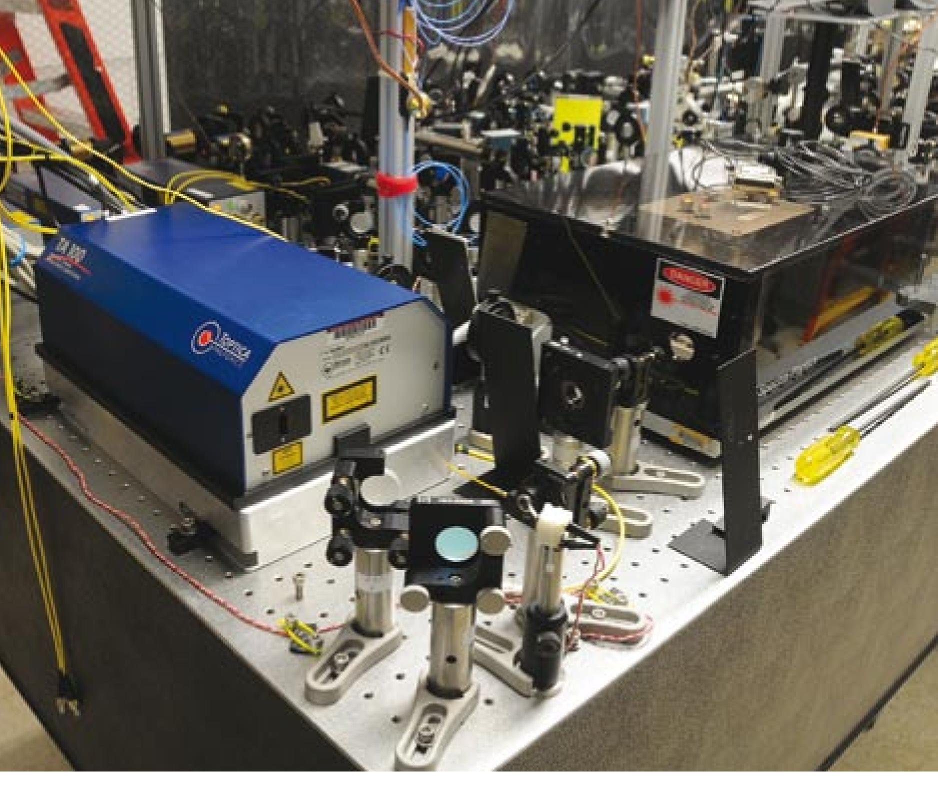
DAVID EMMITE (*ordenador*); GEORGE RETSECK (*esferas*)

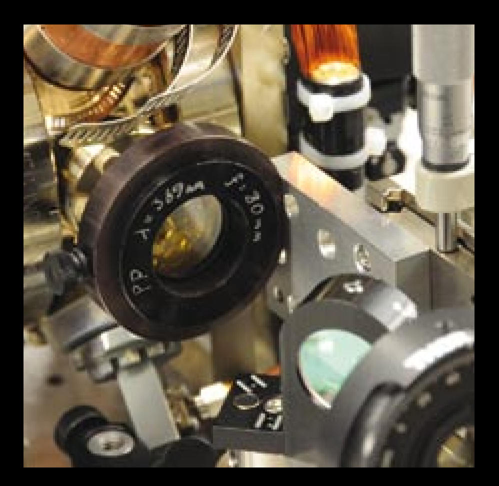
que las interacciones externas dispersas pongan fin a sus cálculos. Este proceso de destrucción, o decoherencia, es la pesadilla de los ordenadores cuánticos. Pero los qubits han de interactuar intensamente entre sí y, en última instancia, deben medirse con precisión para obtener el resultado de sus cálculos.

Se están siguiendo varios caminos para construir el primer prototipo de ordenador cuántico. Nosotros nos centramos en el procesamiento de la información con iones de una sola carga positiva, es decir, con átomos que han sido despojados de un electrón. Hemos atrapado cortas cadenas de iones —confinando las partículas en un vacío por medio de campos eléctricos producidos por electrodos cercanos— a fin de que puedan recibir señales de un láser y compartir los datos entre sí. Perseguimos la construcción de ordenadores cuánticos de una escala mayor, sistemas en los que el número de qubits sea de cientos o miles. Tales sistemas ejecutarían tareas complejas que ningún computador ordinario realizaría.

Atrapar iones

La mecánica cuántica se basa en ondas. Al igual que las ondas sonoras de dos o más cuerdas de piano pueden fusionarse en un acorde, cabe coordinar diferentes estados cuánticos en una superposición. Un átomo puede estar simultáneamente en dos lugares o en dos estados de excitación diferentes. Cuando se mide una partícula cuántica en un estado de superposición, el estado, según la interpretación ordinaria, "colapsa" sobre un único resultado; la probabilidad de cada resultado posible viene dada por las proporciones relativas de las ondas en la superposición (*véase el recuadro* "Fantasmal acción a distancia"). La potencia de un ordenador cuántico derivaría de esas superposiciones: a diferencia de un bit digital corriente, que o vale 0 o vale 1, un





2. EXPERIMENTOS DE MESA DE LABORATORIO han demostrado la viabilidad del procesado de información cuántico. Con láseres (*dispositivo azul en la fotografía de la izquierda*) se generan haces que ciertos espejos dispuestos sobre la mesa van desviando hasta el aparato que contiene el ion atrapado (*arriba*). El láser enfría el ion, drenando su energía cinética, para que pueda manipularse.

qubit puede ser 0 y 1 al mismo tiempo. Un sistema de dos qubits puede almacenar cuatro valores al mismo tiempo: 00, 01, 10 y 11. En general, un ordenador cuántico con N qubits puede manipular simultáneamente 2^N números; una colección de sólo 300 átomos, cada uno de los cuales almacenase un bit cuántico, almacenaría un número de valores mayor que el de partículas del universo visible.

Estas superposiciones cuánticas más grandes están, por lo general, entrelazadas, lo que significa que las mediciones de los qubits individuales se correlacionan. Puede imaginarse el entrelazamiento cuántico como un invisible cableado entre las partículas, de una naturaleza imposible en la física clásica; Einstein lo llamó "fantasmal acción a distancia". En nuestros experimentos con iones atrapados, por ejemplo, cada ion que levita eléctricamente se porta como una aguja imantada microscópica; los estados 1 y 0 del qubit corresponderían a las dos posibles orientaciones de cada uno de esos imanes atómicos (hacia arriba y hacia abajo, digamos).

El enfriamiento por láser, que drena la energía cinética de los átomos mediante la dispersión de fotones, lleva los iones casi al reposo dentro de la trampa. Debido a que los iones residen en una cámara de vacío, están aislados del entorno, aunque la repulsión eléctrica entre ellos les proporciona una interacción intensa para producir el entrelazamiento. Se pueden dirigir rayos láser más delgados que un cabello hacia cada átomo, para manipularlos y medir los datos almacenados en los qubits.

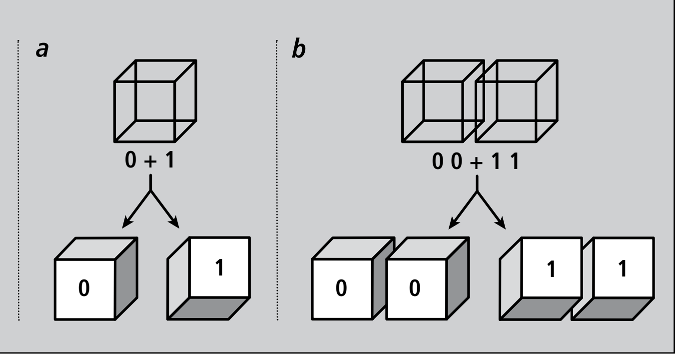
En los últimos años se ha probado con experimentos la viabilidad en principio de la computación cuántica con iones atrapados.

Los autores

Christopher R. Monroe ocupa la cátedra Bice Sechi-Zorn de física en la Universidad de Maryland. Miembro del Instituto Cuántico Conjunto, de Maryland y el Instituto Nacional de Pesos y Medidas (NIST) de Estados Unidos, está especializado en trampas electromagnéticas, enfriamiento por láser y control cuántico de átomos y iones. **David J. Wineland**, que se licenció en la Universidad de California en Berkeley en 1965 y doctoró en la Universidad de Harvard en 1970, dirige el Grupo de Almacenamiento de Iones de la División de Tiempos y Frecuencias del NIST en Boulder, Colorado. El grupo se ha centrado en el enfriamiento por láser y la espectroscopía de iones atómicos atrapados.

FANTASMAL ACCION A DISTANCIA

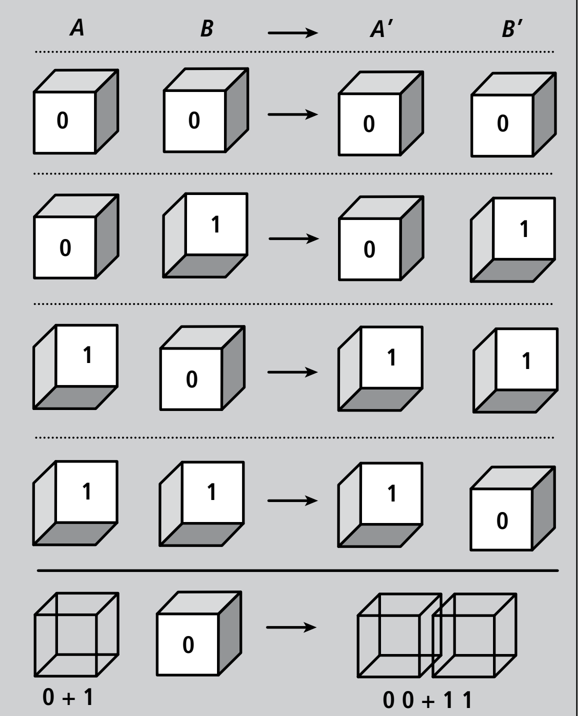
El "cubo ambiguo" (*a*) es como un ion en un estado de superposición: una medición hará que "colapse" en uno de los dos estados definidos (0 o 1). Cuando dos iones se encuentran en una superposición entrelazada (*b*), una medición forzará a ambos iones a encontrarse en el mismo estado (ya sea 0 o 1), aunque no haya conexión física entre ellos.



INSTITUTO CUANTICO CONJUNTO (*arriba*); JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*), FUENTE: *TAKING THE QUANTUM LEAP*, POR FRED ALAN WOLF (*abajo*)

TABLA DE VERDAD

Una computadora de iones atrapados se basaría en puertas lógicas como la puerta "no controlado" (CNOT), que consta de dos iones, A y B. Esta tabla de verdad muestra que si A (el bit de control) tiene un valor de 0, la puerta deja B sin cambios. Pero si A es 1, la puerta invierte B, cambiando su valor de 0 a 1, y viceversa. Y si A se encuentra en un estado de superposición (0 y 1 al mismo tiempo), la puerta coloca a los dos iones en una superposición entrelazada. (Su estado es entonces idéntico al que se muestra en el recuadro "Fantasmal acción a distancia").



JEN CHRISTIANSEN

POTENCIAS DE DOS

El enorme potencial de las computadoras de iones atrapados radica en el hecho siguiente: un sistema con *N* iones puede almacenar 2^N números simultáneamente. Y cuando *N* aumenta, el valor de 2^N aumenta exponencialmente.

2^5 = 32

2^{10} = 1024

2^{50} = 1.125.899.906.842.624

2^{100} = 1.267.650.600.228.229.401.496.703.205.376

Se han generado estados entrelazados de hasta ocho qubits. Se ha demostrado que esos ordenadores rudimentarios ejecutan algoritmos simples. Parece conceptualmente sencillo (aunque técnicamente muy difícil) ampliar la escala del método de los iones atrapados hasta números mucho mayores de qubits. Siguiendo el ejemplo de los ordenadores clásicos, habría que secuenciar unos cuantos tipos de puertas lógicas cuánticas, cada una compuesta de sólo unos pocos iones atrapados. Se podrían adaptar al mundo cuántico técnicas ordinarias de corrección de errores, basadas en el uso de múltiples iones para codificar cada qubit. La codificación redundante de información permite al sistema tolerar errores, siempre que se produzcan a un ritmo suficientemente bajo. Al fin y al cabo, parece muy probable que un ordenador cuántico útil de iones atrapados habrá de almacenar y manipular miles de iones atrapados en complejos conjuntos de electrodos inscritos en chips microscópicos.

El primer requisito de un ordenador cuántico "universal" —uno que pueda realizar todos los cálculos posibles— es una memoria fiable. Si ponemos un qubit en un estado de superposición de 0 y 1, con la orientación magnética del ion apuntando arriba y abajo al mismo tiempo, deberá permanecer en ese estado hasta que los datos se hayan procesado o medido. Es bien sabido que los iones mantenidos en trampas electromagnéticas son muy buenos registros de memoria, con vidas medias de la superposición (o "tiempos de coherencia") superiores a los 10 minutos. Estas vidas medias relativamente largas son consecuencia de la extrema debilidad de la interacción del ion y su entorno.

El segundo ingrediente esencial para la computación cuántica es la capacidad de manipular un qubit individual. Si los qubits se basan en la orientación magnética de un ion atrapado, cabe utilizar campos magnéticos oscilantes, aplicados durante un lapso determinado, para invertir un qubit (cambiándolo de 0 a 1, y viceversa) o para colocarlo en un estado de superposición. Dadas las pequeñas distancias entre los iones atrapados —unas millonésimas de metro—, cuesta centrar los campos oscilantes en un ion individual, pero conseguirlo es importante porque a menudo se desea cambiar la orientación de un qubit sin cambiar la de sus vecinos. Podríamos resolver el problema mediante el uso de rayos láser que se enfocan en el qubit (o qubits) que nos interese.

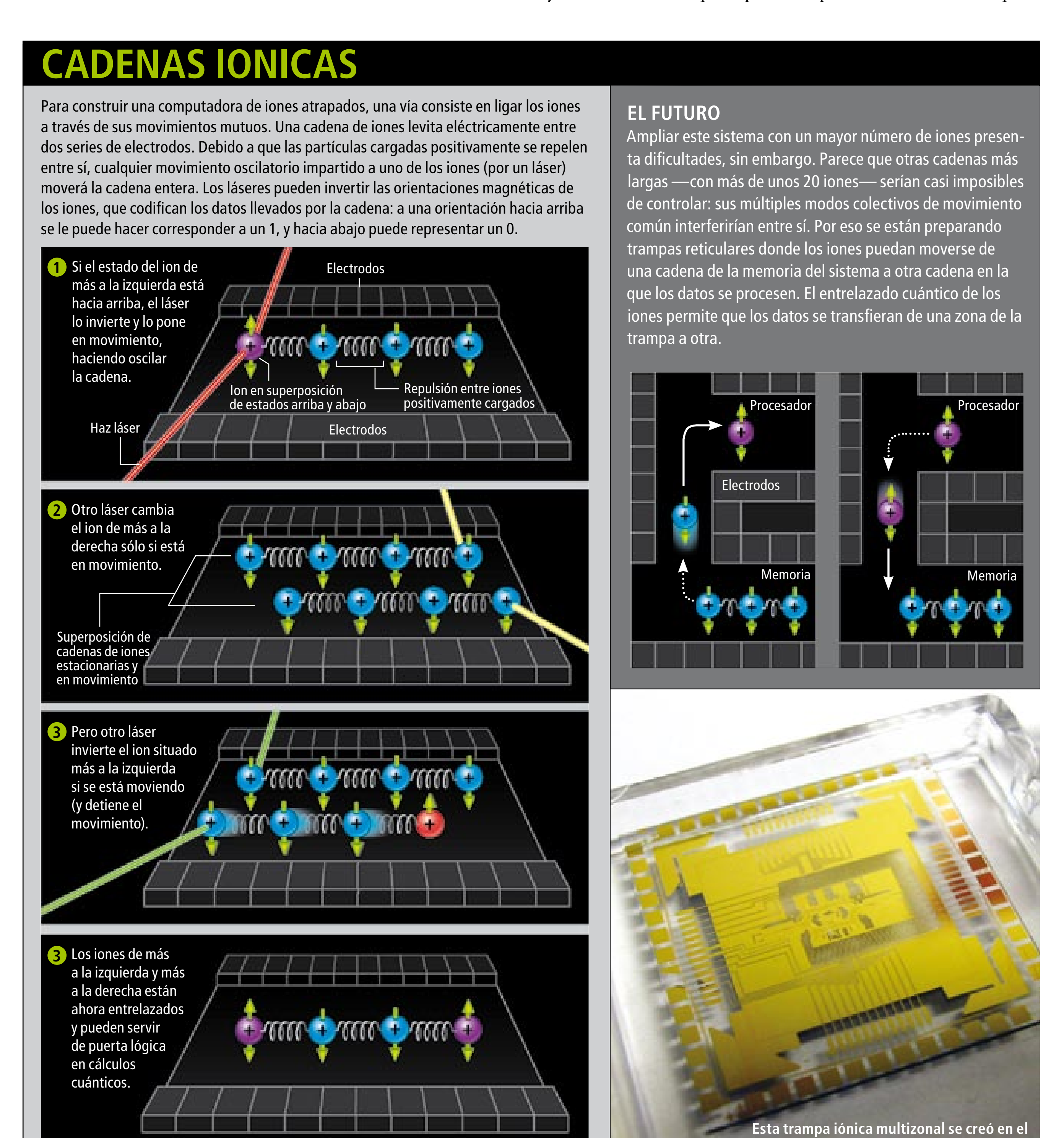
El tercer requisito básico es el diseño de al menos un tipo de puerta lógica entre qubits. Puede adoptar la misma forma que las puertas lógicas clásicas, las puertas AND y OR que son los bloques constituyentes de los procesadores comunes, si bien deberá actuar sobre los estados de superposición propios de los qubits. Una elección popular de una puerta lógica para dos qubits es la llamada puerta "no controlada" (CNOT). Denominemos a los qubits de entrada A y B. A es el bit de control. Si el valor de A es 0, la puerta CNOT deja B sin cambio; si A es 1, la puerta B cambia, pasando su valor de 0 a 1, y viceversa (*véase el recuadro* "Tabla de verdad"). A esta puerta se la conoce también por puerta lógica condicionada: la acción sobre el qubit de entrada B (si el bit se invierte o no) depende de la condición del qubit de entrada A.

Para crear una puerta lógica condicionada entre dos qubits iónicos se necesita acoplarlos; resulta obligado que se hablen entre sí. Como ambos qubits portan carga positiva, sus movimientos estarán muy acoplados entre sí eléctricamente, en una repulsión mutua de Coulomb. En 1995, Juan Ignacio Cirac y Peter Zoller, ambos entonces en la Universidad de Innsbruck, propusieron una forma de utilizar dicha interacción coulombiana para acoplar indirectamente los estados internos de los dos qubits iónicos y hacer realidad una puerta CNOT. Ofrezcamos una breve descripción de una variante de su puerta:

Imaginemos dos canicas en un cuenco. Supongamos que están cargadas y se repelen entre sí. Ambas querrán situarse en el fondo del cuenco, pero la repulsión coulombiana

hará que se queden en lados opuestos del cacharro, un poco pared arriba. En ese estado las canicas tenderán a moverse en tándem: podrían, por ejemplo, oscilar hacia adelante y hacia atrás en el cuenco a lo largo de su dirección de alineación, preservando al mismo tiempo la distancia de separación entre ellas. Un par de qubits en una trampa de iones experimentaría también ese movimiento común, oscilando hacia delante y hacia atrás como los pesos de dos péndulos conectados por un muelle. Se puede excitar el movimiento común mediante la presión de los fotones de un haz láser modulado a la frecuencia natural de oscilación de la trampa (*véase el recuadro* "Cadenas iónicas").

Más importante aún, podremos provocar que el haz láser afecte al ion sólo si su orientación magnética apunta hacia arriba, lo que aquí corresponde a un valor del qubit



Esta trampa iónica multizonal se creó en el Instituto Nacional de Pesos y Medidas de Estados Unidos.

JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*); JASON AMINI NIST (*trampa iónica*)

de 1. Además, la orientación de las agujas magnéticas microscópicas girará mientras se encuentren oscilando en el espacio, y la cantidad de rotación dependerá de que sea uno de los iones o sean ambos los que se hallen en el estado 1. El resultado neto es que, si aplicamos una determinada fuerza láser a los iones durante un tiempo bien ajustado, podremos crear una puerta CNOT. Cuando los qubits se inicializan en estados superpuestos, la acción de esa puerta entrelaza los iones, operación fundamental para la consecución de una computación cuántica arbitraria entre muchos iones.

Grupos de la Universidad de Innsbruck, la Universidad de Michigan en Ann Arbor, el Instituto Nacional de Pesos y Medidas de Estados Unidos y la Universidad de Oxford han conseguido trabajar con puertas CNOT. Ninguna de tales puertas funciona perfectamente. Las limitan distintos factores, así las fluctuaciones de intensidad del láser o la presencia de campos eléctricos ambientales, que comprometen la integridad de los movimientos de los iones excitados por láser. Actualmente podemos crear puertas de dos qubit que funcionen con una "fidelidad" de poco más del 99 por ciento, lo que significa que la probabilidad de que la puerta funcione erróneamente es menor que el 1 por ciento. Sin embargo, un ordenador cuántico útil habrá de tener una fidelidad de alrededor del 99,99 por ciento, si se quiere que las técnicas de corrección de errores operen como es debido. Los grupos de investigación con iones atrapados se proponen, entre sus tareas principales, reducir el ruido de fondo lo suficiente para que se alcancen los objetivos aludidos. Aunque el esfuerzo será enorme, no hay ningún obstáculo de principio que impida lograrlos.

Autopistas de iones

Mas, ¿es realmente factible construir un ordenador cuántico digno de ese nombre con iones atrapados? Desgraciadamente, parece que controlar cadenas de iones más largas —por encima de los 20 qubits— sería casi imposible porque sus múltiples modos colectivos de movimiento común interferirían entre sí. Por eso, se ha empezado a tantear la idea de dividir el equipamiento cuántico en segmentos manejables; los cálculos se realizarían con cadenas cortas de iones que se llevarían de un lugar a otro del chip del ordenador cuántico. Fuerzas eléctricas moverían las cadenas de iones sin perturbar sus estados internos, preservándose así los datos que contuviesen. Y se podría entrelazar una cadena con otra para transferir datos y realizar tareas de procesamiento que requieran la acción de muchas puertas lógicas.

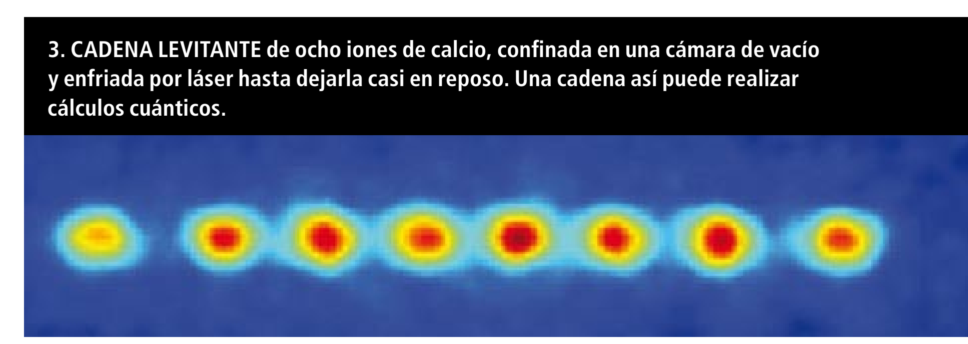
La ciencia de la información cuántica ofrece la oportunidad de cambiar radicalmente la computación. Por fin se podrá realizar el sueño de crear una máquina cuántica que resuelva tareas que antes se creía inabordables.

La arquitectura resultante se asemejaría en cierto sentido a los dispositivos de carga acoplada (CCD) de las cámaras digitales; al igual que un CCD puede mover carga eléctrica a lo largo de una serie de condensadores, un chip cuántico podría impulsar cadenas de iones individuales a través de una red de trampas lineales.

Muchos de los experimentos con iones atrapados del Instituto Nacional de Pesos y Medidas de Estados Unidos incluían el transporte de iones a través de una trampa lineal multizonal. La extensión de esta idea a sistemas mucho mayores, sin embargo, requerirá estructuras más complejas, con una gran cantidad de electrodos que guiarían a los iones por cualquier dirección. Los electrodos tendrían que ser muy pequeños —en el rango de las 10 a las 100 millonésimas de metro— para confinar y controlar el transporte de iones con precisión. Afortunadamente, los constructores de ordenadores cuánticos con iones atrapados pueden aprovechar las técnicas de microfabricación, como los sistemas microelectromecánicos (MEMS) y la litografía de semiconductores, que ya se utilizan para construir los chips de ordenador.

Durante el año pasado, varios grupos de investigación han presentado la primera trampa iónica integrada. Científicos de la Universidad de Michigan y del Laboratorio de Ciencias Físicas de la Universidad de Maryland emplearon una estructura semiconductora de arseniuro de galio para su chip cuántico. Los investigadores del Instituto de Pesas y Medidas han desarrollado una nueva geometría de trampa iónica, en la que los iones flotan por encima de la superficie de un chip. Grupos de Alcatel-Lucent y del Laboratorio Nacional Sandia han fabricado trampas de iones en chips de silicio aún más imaginativas. Queda mucho por refinar en tales trampas en chips. El ruido atómico que emana de las superficies cercanas debe reducirse, tal vez enfriando los electrodos con nitrógeno líquido o helio líquido. Y hay que guiar el movimiento de los iones a través del chip, de modo que el calentamiento de las partículas no perturbe sus posiciones. Por ejemplo, para

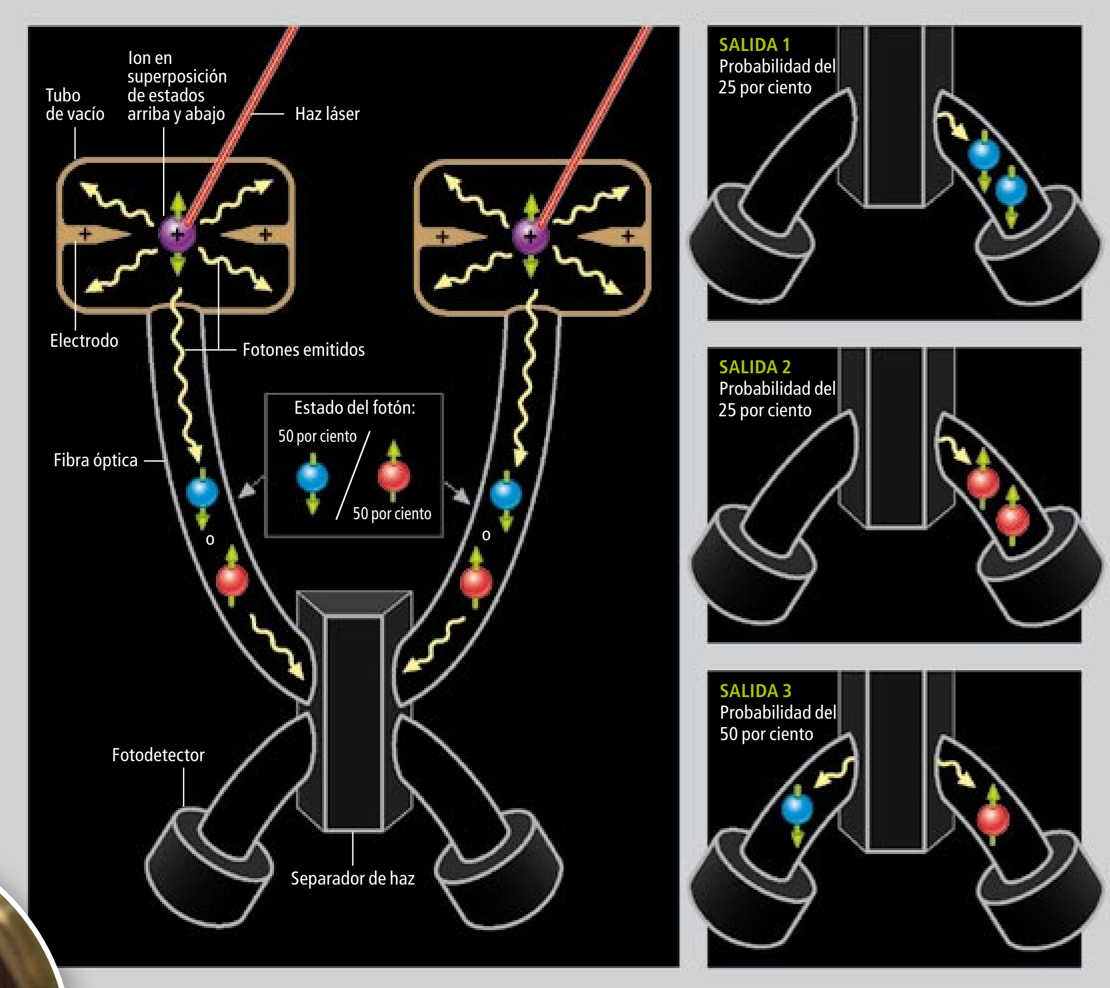
3. CADENA LEVITANTE de ocho iones de calcio, confinada en una cámara de vacío y enfriada por láser hasta dejarla casi en reposo. Una cadena así puede realizar cálculos cuánticos.



CORTESIA DE RAINIER BLATT *Universidad de Innsbruck*

LIGAR IONES POR MEDIO DE FOTONES

Un enfoque alternativo a la computación con iones atrapados consiste en establecer un vínculo entre los iones por medio de los fotones que emiten. Con pulsos de láser se excitan dos iones atrapados situados a gran distancia (*morado*), cada uno aislado en un tubo de vacío (*fotografía inferior*). Emiten entonces fotones hacia fibras ópticas. Las frecuencias de los fotones dependen de la orientación magnética de los iones; un fotón emitido por un ion en un estado de superposición de 50-50 —medio hacia arriba, medio hacia abajo— se hallaría en una superposición de frecuencias (en este ejemplo, mitad rojo y mitad azul). Si los fotones de los dos iones se encuentran en el mismo estado, el separador de haz los dirigirá a ambos a un fotodetector. Pero si los fotones se hallan en diferentes estados, irán a detectores separados. Una vez que esto suceda, los iones estarán entrelazados, porque no se podrá decir qué ion ha emitido qué fotón.



que el transporte de iones en torno a una simple esquina de una unión T se requiere una fina sincronización de las fuerzas eléctricas.

La conexión fotónica

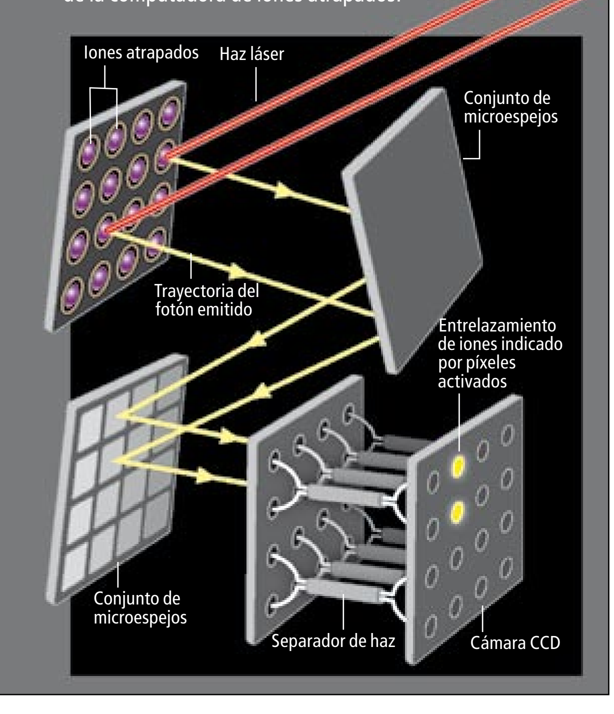
Mientras tanto, otros siguen un camino diferente para construir computadoras cuánticas con iones atrapados. Su enfoque quizá solvente algunas de las dificultades con que tropieza el control del movimiento de los iones. En lugar de acoplar los iones por medio de sus movimientos oscilatorios, se valen de fotones para conectar los qubits. En un procedimiento basado en ideas enunciadas en 2001 por Cirac, Zoller y sus colaboradores Luming Duan, de la Universidad de Michigan, y Mikhail Lukin, de la Universidad de Harvard, cada ion atrapado emite fotones, de manera que las propiedades de los fotones —la polarización o el color— queden entrelazadas con los estados magnéticos internos del qubit del ion emisor. Los fotones recorren fibras ópticas hasta un separador de haz, un dispositivo normalmente utilizado para dividir un rayo de luz en dos; en esta configuración, sin embargo, el separador de haz funciona a la inversa: los fotones se aproximan al dispositivo desde lados opuestos y, si las partículas tienen la misma polarización y color, interfieren entre sí y sólo pueden emerger a lo largo de la misma trayectoria. Pero si los fotones tienen diferentes polarizaciones o colores —lo que indica que los iones atrapados se encuentran en diferentes estados de qubit—, las partículas podrán seguir caminos separados hacia un par de detectores (*véase el recuadro* "Ligar iones por medio de fotones"). El punto importante aquí es que, una vez detectados los fotones, no es posible decir qué ion ha emitido qué fotón. Este fenómeno cuántico produce entrelazamiento entre los iones.

Los fotones emitidos, sin embargo, no se recogen o detectan con éxito en cada intento. De hecho, la mayoría de las veces los fotones se pierden y los iones no se entrelazan. Pero es posible enmendar el error: se repite el proceso y se espera a que los fotones se cuenten simultáneamente en los detectores. En cuanto

JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*); STEVEN OLMSCHENK *Instituto Cuántico Conjunto y Universidad de Maryland (trampa de iones)*

EL FUTURO

Los investigadores están entusiasmados con el método de la vinculación por fotones, ya que ofrece una manera sencilla de conectar un gran número de iones. Podemos dirigir haces láser a un conjunto de iones atrapados. Los fotones emitidos viajarían a un banco de separadores de haz. Una cámara de dispositivo de carga acoplada (CCD) detecta cuándo un par cualquiera de iones queda entrelazado; cada entrelazamiento aumentará la capacidad de procesado de la computadora de iones atrapados.



se consigue, aunque los iones se hallen muy separados la manipulación de uno de los qubits afectará al otro, lo que permite la construcción de una puerta lógica CNOT.

Científicos de la Universidad de Michigan y de la Universidad de Maryland han logrado entrelazar con éxito dos qubits de iones atrapados, separados entre sí alrededor de un metro, por medio de la interferencia de sus fotones emitidos. El principal obstáculo en tales experimentos estriba en la baja tasa de generación de entrelazado; la probabilidad de capturar estos fotones individuales en una fibra es tan pequeña, que los iones se entrelazan sólo unas pocas veces por minuto. Este ritmo podría crecer muchísimo rodeando cada ion con espejos muy reflectantes dentro de una cavidad óptica, lo que mejoraría enormemente el acoplamiento de la emisión de iones con las fibras ópticas; sin embargo, hoy en día resulta muy difícil efectuar esta mejora. Pese a todo, siempre y cuando la interferencia finalmente se produzca, se podrá utilizar el sistema para el procesamiento cuántico de información. (El procedimiento recuerda la instalación de la televisión por cable en una casa: aunque haya que llamar muchas veces por teléfono para conseguir que el proveedor de servicios instale el sistema, el cable se instalará y podrá verse la televisión.)

Por otra parte, se pueden ampliar las operaciones cuánticas con puertas a grandes números de qubits gracias a la conexión mediante fibra óptica de emisores iónicos adicionales y repetir el procedimiento hasta que se establezcan más vínculos entrelazados. Deberíase también poder usar a la vez el acoplamiento fotónico y el acoplamiento por movimiento del que se habló antes para conectar grupos de iones atrapados a distancias remotas, incluso en puntos opuestos del planeta. En tal idea se basa un "repetidor cuántico": en él, pequeños ordenadores cuánticos se conectarían en red a distancias periódicas para mantener un qubit a medida que viaja a lo largo de cientos de kilómetros. Sin un tal sistema, los datos se perderían para siempre.

El futuro cuántico

Nos hallamos lejos de construir una computadora cuántica que pueda superar los problemas inasequibles para las máquinas ordinarias, la factorización de números muy grandes, por ejemplo. Sin embargo, algunas características del procesado de información cuántico ya están encontrando usos en el mundo real. En ese sentido, varias de las operaciones lógicas necesarias para las puertas de dos qubits pueden emplearse en relojes atómicos, que marcan el tiempo basándose en la frecuencia de la radiación emitida cuando los átomos transitan entre estados cuánticos. Y es posible aplicar las técnicas de entrelazado de iones atrapados para aumentar la sensibilidad de las mediciones en espectroscopía, el análisis de la luz emitida por átomos excitados.

El campo de la ciencia de la información cuántica promete cambiar radicalmente las reglas de la computación. Los grupos de iones atrapados se encuentran en la vanguardia porque ofrecen un nivel de aislamiento del entorno que no puede igualar casi ningún otro sistema físico. Al mismo tiempo, mediante el uso de láseres, resulta fácil preparar y medir superposiciones cuánticas entrelazadas concebidas para números pequeños de iones. En los próximos años, esperamos que una nueva generación de chips de iones atrapados allane el camino hacia los ordenadores cuánticos con un número mucho mayor de qubits. Se realizará entonces por fin el sueño de crear una máquina cuántica que haga frente a hercúleas tareas que antes se creían imposibles.

LA PEQUEÑA FRONTERA

Construir una computadora con átomos individuales como elementos de memoria es, en cierto sentido, un límite natural de la miniaturización de las computadoras. Pero Richard Feynman afirmó en su famosa conferencia de 1959 titulada "Al fondo hay mucho espacio":

"Al llegar al mundo de lo muy, muy pequeño —digamos que a circuitos de siete átomos—, nos encontramos con muchas cosas nuevas, que le ofrecen al diseño posibilidades inéditas. No hay nada que, a gran escala, pueda comportarse como los átomos a pequeña, porque los átomos obedecen a las leyes de la mecánica cuántica."

Bibliografía complementaria

QUANTUM INFORMATION PROCESSING WITH ATOMS AND PHOTONS. Christopher R. Monroe en *Nature*, vol. 416, n.º 6877, págs. 238-246; 14 de marzo, 2002.

REGLAS PARA UN MUNDO CUANTICO COMPLEJO. Michael A. Nielsen en *Investigación y Ciencia*, n.º 316, págs. 44-53; enero, 2003.

LOS LIMITES DE LA COMPUTACION CUANTICA. Scott Aaronson en *Investigación y Ciencia*, n.º 380, págs. 62-69; mayo, 2008.

Potenciadores del sabor

Compuestos que intensifican los sabores dulce y salado de los alimentos podrían ayudar a combatir la obesidad y las enfermedades cardíacas

Melinda Wenner

CONCEPTOS BASICOS

- Se han descubierto compuestos diminutos que dan a los alimentos un sabor más dulce, más salado o más sabroso del que tienen en realidad. Gracias a ellos se podría reducir la cantidad de azúcar, sal o glutamato monosódico que suele añadirse a los alimentos.
- Varios de esos potenciadores del sabor se están ensayando en productos comerciales.
- Está por ver si la ingesta calórica de los individuos se va a reducir cuando los alimentos porten sabores más intensos. Podría ser que el consumo de dulces obedeciera a razones sin relación con el sabor.

Los humanos tenemos implantada en nuestro cerebro la adoración por los alimentos dulces, que nos suministran energía, los sabrosos, que nos aportan proteínas, y los salados, que contienen electrolitos necesarios. En la actualidad, sin embargo, debido a la producción masiva de alimentos cargados de azúcares y sales, esas proclividades nuestras resultan en una tendencia a la obesidad, las cardiopatías y la diabetes de tipo 2, males que se cuentan entre los más graves problemas sanitarios de nuestra sociedad.

Ahora bien, ¿y si un puñado de compuestos formados por moléculas diminutas engañara a nuestro cerebro y lograra que nos alimentásemos de forma distinta? Tal es la idea que inspira a la nueva ciencia de la modulación del sabor. Se han desvelado los pertinaces misterios de la biología de los gustos y se están desarrollando compuestos de escaso precio y efectos poderosos, responsables de que los alimentos adquieran sabores más dulces, más salados o más sabrosos (con más "cuerpo") del que realmente tienen. La adición a los alimentos tradicionales de dosis minúsculas de esos moduladores del sabor permitirá reducir las cantidades de azúcar, sal o glutamato monosódico necesarias para provocar satisfacción, con lo que se obtendrían alimentos más saludables.

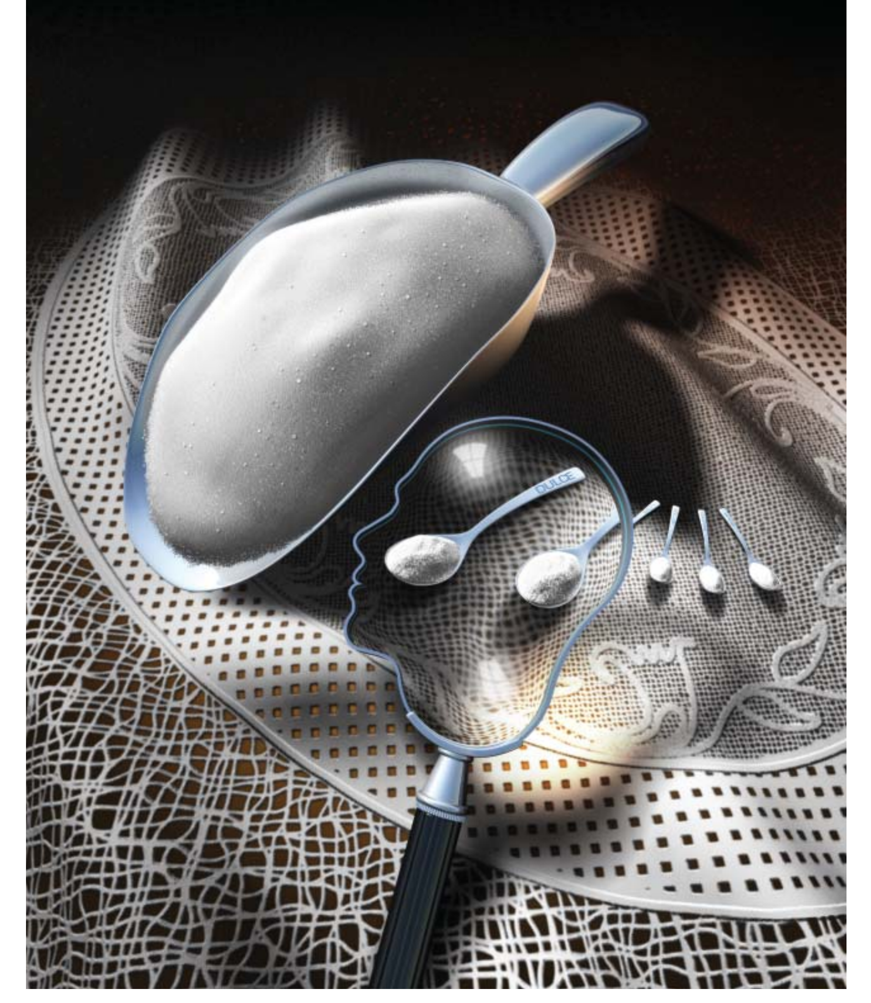
Senomyx, una compañía asentada en San Diego, se encuentra en la vanguardia de la nueva técnica, a la que están respondiendo grandes compañías. Nestlé, por ejemplo, incorpora desde el año pasado moduladores del sabor sabroso en sus preparados de caldos y sopas. Coca-Cola y Cadbury tienen la intención de empezar a utilizar productos de Senomyx a comienzos de 2009.

Senomyx está diseñando, asimismo, bloqueadores del sabor amargo, con el fin de mejorar el sabor de alimentos poco apetitosos. Ello aumentaría las fuentes de nutrientes del mundo. Si, por ejemplo, se pudiera enmascarar el regusto amargo de las proteínas de la soja, podrían utilizarse en mayor cantidad, con lo que se alimentaría a un número de personas mayor. Los bloqueadores de marras darían mejor sabor a las medicinas, con lo que reducirían la resistencia de muchos pacientes a tomarlas.

El engaño de nuestras papilas gustativas ahorraría a la industria alimentaria una buena cucharada de dinero, pues se sustituirían volúmenes ingentes de azúcar, sal y otros ingredientes por diminutas dosis de compuestos baratos. Y lo que reviste mayor importancia, los moduladores del sabor resultarían sumamente beneficiosos para nuestra salud, haciendo que lo que sabe bien sea bueno para nosotros.

Nuevo mapa gustativo

La indagación sobre los moduladores del sabor dio comienzo en 1996. Charles Zuker, de la Universidad de California en San Diego (UCSD), se percató de que la bibliografía prevaleciente sobre la biología del gusto podía ser errónea. Los humanos percibimos cinco sabores: dulce, salado, amargo, ácido y sabroso (o umami, que en japonés significa "sabor delicioso"). En la escuela nos habían enseñado que la lengua se dividía en regiones, que detectaban cada una un sabor concreto. Se descubrió entonces que las papilas gustativas repartidas por la lengua y la cavidad bucal contienen pequeños grupos de células que facultan a cada papila para la detección de todos esos sabores. Zuker estaba de acuerdo, pero no



NICK ROTONDO

podía aceptar el corolario de que cada célula en una papila gustativa tuviera la capacidad de distinguir entre cinco sabores.

En opinión de Zuker, carecía de sentido, desde un punto de vista evolutivo, que una misma célula fuese responsable de la detección de algo bueno, como el azúcar, y de algo nocivo, como un tóxico (amargo). Son muchas las células sensoriales con capacidad de distinguir entre estímulos opuestos, pero cada uno de nuestros dominios sensoriales contiene también células cuya función primordial consiste en responder a un estímulo concreto (por ejemplo, las células epiteliales que responden sólo a determinada gama de temperaturas). Zuker no podía aceptar la idea de que una célula gustativa individual pudiera evocar conductas diametralmente opuestas, como la atracción y la aversión, o la vida y la muerte. En vez de ello, una papila gustativa alojaría células para lo dulce, células para lo salado, células para lo amargo, etcétera.

Si las células del gusto poseyeran tal especificidad, su manipulación resultaría mucho más sencilla, con importantes repercusiones en la industria alimentaria. Zuker razonó que las células gustativas habrían de contar con sensores específicos, o receptores, en su membrana externa. Un receptor del sabor salado se uniría a una molécula de sal, pero no a una molécula de dulzor o de amargor. Carecía, empero, de pruebas para su teoría.

Como primer paso, Zuker debía aislar los receptores del gusto, algo que nadie había realizado jamás. Con sus colegas de la UCSD, extrajo células gustativas de la lengua de ratones de laboratorio y comparó los genes que se hallaban expresados en cada célula. Al cabo, encontraron genes que codificaban dos proteínas desconocidas; por su estructura, dedujeron que éstas se alojaban en la superficie celular y que probablemente operaban a modo de receptores. Las denominaron T1R1 y T1R2.

Ahora bien, cuando Zuker trató de comprender la función de dichas proteínas, se tropezó con un muro. Ninguna de las dos funcionaba por sí sola como un receptor gustativo completo. Zuker recordó que no todos los ratones mostraban igual preferencia por los alimentos dulces; algunos incluso los despreciaban. Estudios previos habían demostrado que esos múridos apáticos tenían un defecto genético. Al estudiar los ratones de marras, Zuker dió con otro hipotético receptor, cuyo gen *T1R3* correspondía al gen que diferenciaba los ratones que no apreciaban el dulce de los ratones normales. Cuando introdujo una copia funcional de *T1R3* en las células gustativas de los ratones "desaboridos" suscitó en ellos el gusto por lo dulce.

Tras algunos experimentos más, Zuker y sus colaboradores resolvieron la estructura y la función de los receptores de los sabores de lo dulce y lo sabroso. Cada tipo de receptor constaba de dos partes. El correspondiente al sabor dulce consistía en T1R2 y T1R3; el correspondiente al sabroso, T1R1 y T1R3. Zuker logró poco después identificar también los receptores del sabor amargo (25 en total), así como el receptor responsable de la detección de lo ácido. En todos los casos, cada célula gustativa contenía los receptores correspondientes a un sabor.

Zuker comprendió que sus descubrimientos, además de arrojar luz sobre aspectos básicos de la biología del gusto, facilitarían el diseño de compuestos que interactuasen con un solo receptor (el correspondiente a dulce o a salado, por ejemplo) para modificar de forma concreta la percepción del sabor. En 1998, Zuker y varios socios fundaron una compañía que se convertiría en Senomyx.

Sabores a millares

En el pasado, para identificar sabores nuevos, las compañías alimentarias procedían de forma empírica: experimentaban los productos mediante catadores, que degustaban un producto por vez. Era un proceso tedioso. No podían ensayarse más de unos pocos miles de compuestos al año.

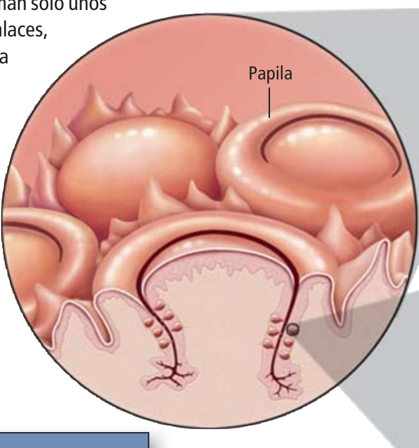
El modelo "sabor-receptor" de Zuker, en cambio, permitió identificar con prontitud

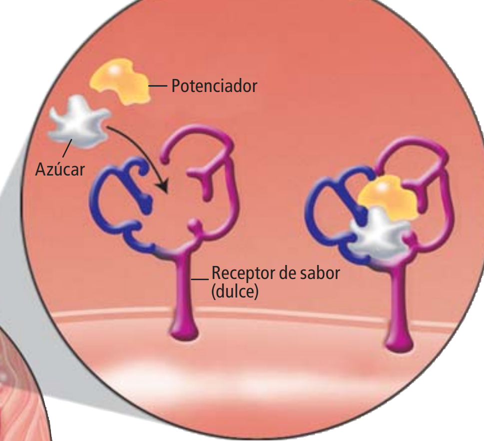
EL ESCURRIDIZO UMAMI

Aunque este sabor fue descubierto hace un siglo, se sigue discutiendo que el umami constituya un quinto sabor entre los fundamentales que reconoce la lengua. Término japonés que significa "sabrosidad" o "deliciosidad", se aplica a carnes, quesos, caldos y otros alimentos ricos en proteínas, para expresar que tienen "cuerpo". Aunque la sensación puede ser más sutil que las de salado o dulce, los expertos sostienen que se trata de una propiedad peculiar y no de una combinación de otros sabores básicos.

INTENSIFICACION DEL SABOR

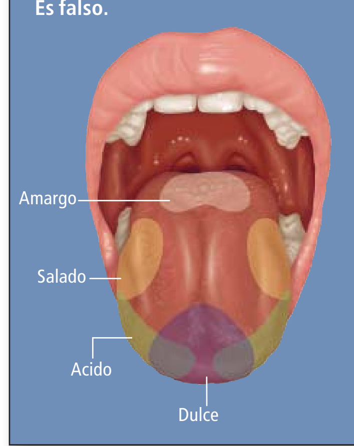
Contrariamente a lo que afirmaban los modelos antiguos (*abajo, izquierda*), no existen en la lengua regiones específicas que detecten un solo tipo de sabor. En realidad, en el interior de las papilas gustativas repartidas por la lengua se alojan unas yemas (protuberancias) que perciben los distintos sabores. Cada yema contiene células gustativas que responden a los sabores dulce, salado, agrio, amargo o umami (sabroso). Los receptores que residen en la superficie de las células detectoras del sabor dulce, por ejemplo, se unen a moléculas de azúcar. Si se forman sólo unos pocos de esos enlaces, la yema gustativa envía al cerebro una señal débil; si la concentración de moléculas de azúcar es mayor, aumenta parejamente el número de enlaces y la intensidad de la señal de dulzor. Las moléculas potenciadoras del sabor, aunque no envían señales por sí mismas, aumentan la probabilidad de enlace entre las moléculas de azúcar y sus receptores, de modo que intensifican la sensación aunque el azúcar se halle presente en cantidades limitadas.





MODELO OBSOLETO

Se creía que cada región de la lengua percibía un solo sabor. Es falso.



FRESCO Y CREMOSO

Además de manipular los cinco sabores fundamentales, en Senomyx se están desarrollando compuestos que, como el mentol, producen en la boca una sensación de frescor. También están explorando la percepción de los sabores "graso" y "cremoso". Se trata de campos vírgenes en la ciencia. Nunca se había hecho nada semejante.

nuevos moduladores del sabor. Inspirándose en las matrices poliméricas que utilizan las compañías farmacéuticas para detectar nuevos fármacos, Zuker diseñó retículos dotados de millares de "células gustativas" artificiales, en las que cada receptáculo contenía un tipo de receptor de sabor. Introdujo entonces en los "catadores robóticos" millares de moduladores del sabor potenciales para ver cuáles interactuaban con qué tipos de células.

Senomyx cuenta en la actualidad con una biblioteca de medio millón de compuestos, naturales y sintéticos. Su técnica permite hallar moléculas de interés a partir del examen de cientos o miles de compuestos (viene a ser como encontrar una aguja en un pajar). Una vez identificado un compuesto que interactúa de forma exclusiva con una célula gustativa, el proceso de identificación se utiliza para perfeccionar sus propiedades físicas. Ciertos compuestos han de ser solubles o conservar sus efectos al ser calentados. Muchos deben mantener durante meses su estabilidad en los productos. Senomyx desarrolla procedimientos de evaluación de tales características. Pueden incluso introducir la nueva muestra en un copo de cereal y observar cómo se comporta y qué sabor tiene.

La compañía patenta los compuestos prometedores e inicia las certificaciones de seguridad a través de la Asociación de Fabricantes de Sabores y Extractos, con sede en Washington D.C. El programa GRAS (de "considerado seguro de forma general", en inglés) fue implantado por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos (FDA) estadounidense en 1960, con el fin de supervisar las valoraciones de seguridad de los compuestos saborizantes consumidos en pequeñas cantidades. Al ser tan limitadas las cantidades utilizadas, dichos compuestos no deben someterse al ensayo de seguridad, mucho más riguroso, que la FDA exige para los "aditivos" alimentarios. Cuando Senomyx presenta un compuesto nuevo, un jurado de expertos independientes decide, basándose en las propiedades químicas, si su consumo resultará seguro.

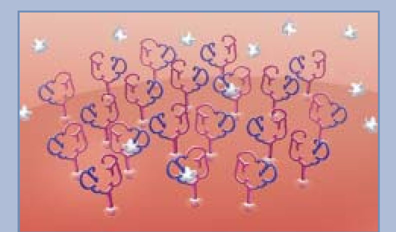
Aunque el proceso puede durar dos años, no faltan quienes ponen en duda su validez. Según Michael Jacobson, director del Centro de Ciencia para Interés Público en Washington D.C., ocurre que en el proceso GRAS es el zorro quien guarda el gallinero. Con todo, reconoce que los compuestos saborizantes, aplicados en dosis limitadas, suelen ser inocuos y no existe un historial de problemas de seguridad.

Más dulce

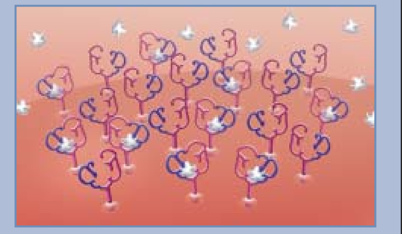
Los trabajos punteros de Senomyx persiguen edulcorantes más eficaces. Los sustitutos hipocalóricos del azúcar disponibles en la actualidad, como el aspartamo, la sucralosa o la sacarina, a menudo dejan un regusto amargo al utilizar-

ALICE Y. CHEN

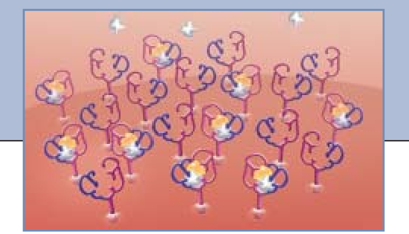
Pocas moléculas de azúcar: sabor débil



Abundantes moléculas de azúcar: dulzor intenso



Poco azúcar más potenciador: dulzor intenso



se en las concentraciones necesarias, que son elevadas. Según Gary Beauchamp, director de Monell Chemical Sense Center, de Filadelfia, esos productos dejan mucho que desear desde el punto de vista organoléptico. Los refrescos *light*, por ejemplo, nunca tienen tan buen sabor como los originales, ya que su regusto amargo altera la percepción del cerebro.

Si se utilizaran dosis menores del sucedáneo, la senda cerebral correspondiente al sabor amargo no se activaría. (La *Coca-Cola zero*, de la que se dice que tiene mejor sabor que la *Coca-Cola light*, utiliza una mezcla de edulcorantes cuyo volumen conjunto es más pequeño; al ser menor la cantidad de sucedáneo se evita la activación del receptor del sabor amargo.)

La capacidad para ensayar numerosos compuestos de forma simultánea hizo pensar a Zuker que Senomyx podría identificar moléculas que, careciendo de sabor propio, interactuasen con los edulcorantes y sus receptores, de modo que intensificasen la percepción del dulzor. Al conocer los receptores, tal vez podría lograrse que una pizca de azúcar supiera como una cucharada sopera.

Tras evaluar unos 200.000 compuestos, los investigadores de Senomyx descubrieron uno que cuadruplicaba el dulzor de la sucralosa. Ese compuesto ha obtenido hace poco aprobación de la Asociación de Fabricantes de Sabores y Extractos; podría empezar a utilizarse en productos comerciales a principios de 2009. Tiene un enorme mercado potencial: hay en el mercado unos 5000 productos que contienen sucralosa. Senomyx ha encontrado también un potenciador que duplica el dulzor de la sacarosa (azúcar de mesa). Este producto permitiría reducir el contenido calórico de los alimentos sin modificar su sabor. Los productos de régimen tendrían mejor sabor que ahora.

El primer potenciador del sabor sabroso obtenido por Senomyx se encuentra ya en algunos productos de Nestlé. El compuesto logra que tengan "más cuerpo" (rasgo común en los alimentos ricos en proteínas, como la carne y el queso, y en aperitivos como las patatas fritas de sabores), sin necesidad de recurrir a las grandes cantidades del glutamato monosódico que suelen añadirse para lograr ese efecto.

También para amargo y salado

Senomyx está desarrollando también bloqueadores del sabor amargo. Amén de ampliar el uso de proteínas de soja, eliminarían el regusto amargo del cacao con la reducción consiguiente de la cantidad de azúcar que se añade a los productos basados en el mismo. Tales bloqueadores serían útiles para las compañías farmacéuticas, interesadas en desarrollar "cultivos farmacéuticos": arroces o habas de soja, por ejemplo, que contengan vacunas orales para la hepatitis B y otras enfermedades; se cultivarían en países en vías de desarrollo, donde el acceso a las vacunas es limitado. Si los componentes medicamentosos confieren mal sabor a esos alimentos, no tendrán aceptación entre la población; sin embargo, un bloqueador adecuado (y de precio asequible) podría evitar el rechazo.

Otra compañía, Redpoint Bio, de Ewing (Nueva Jersey), está desarrollando bloqueadores con una metodología distinta. No busca compuestos que afecten a los receptores superficiales de las células gustativas, sino que persigue compuestos que interactúen con otras vías de señalización del interior de tales células. Una de las dianas corresponde al canal iónico TRPM5. Redpoint está buscando compuestos que lo bloqueen o que lo activen. La compañía, que colabora con Coca-Cola y con Givaudan (fabricante de saporizantes y aromatizantes), estima que en el plazo de dos años habrá en el comercio productos que contengan sus compuestos.

La sal se cuenta, asimismo, entre los objetos a domeñar, pues se encuentra asociada a las enfermedades cardiovasculares. Senomyx acaba de identificar el receptor primario responsable de la percepción de la sal: un poro o canal que se extiende sobre la membrana de una célula gustativa y permite el paso de iones de sodio e hidrógeno hacia el interior celular. Compuestos que interactuasen con el canal potenciarían el efecto salado. La reducción de la ingesta de sal, incluso en una cantidad reducida, ejercería un señalado impacto sobre la salud y la calidad de vida. Si resulta tan difícil cambiar los hábitos alimentarios de las personas, tal vez resulte más eficaz modificar sus percepciones. En el plazo de algunos años, quizá consumamos alimentos con una fracción de las calorías y de la sal que solían contener, sin apreciar la diferencia.

Está por ver, no obstante, que la gente vaya a consumir menos calorías si los alimentos mejoran el sabor y son más saludables. El consumo de grandes cantidades de alimentos dulces podría obedecer a razones que nada tienen que ver con el sabor. Monell, que ha recibido financiación de Senomyx, está estudiando las preferencias de la gente para determinar si el sabor influye sobre la digestión, el metabolismo o el apetito, y el modo en que el organismo controla la conducta alimentaria. Los primeros resultados sugieren que las preferencias sobre sabores están consolidadas ya hacia los tres meses de edad y que los alimentos que tome la madre durante el embarazo y lactancia influyen en los que su prole encontrará de su gusto. Pero el vínculo entre los sabores preferidos y la sensación de saciedad no está clara todavía. Hay que seguir investigando.

La autora

Melinda Wenner escribe sobre temas científicos. Reside en Nueva York.

Bibliografía complementaria

TASTE PERCEPTION: CRACKING THE CODE. Jane Bradbury en *PLoS Biology*, vol. 2, n.º 3, págs. 0295-0297; 16 de marzo, 2004.

THE SEARCH FOR SWEET: BUILDING A BETTER SUGAR SUBSTITUTE. Burkhard Bilger en *NewYorker*, pág. 40; 22 de mayo, 2006.

THE RECEPTORS AND CELLS FOR MAMMALIAN TASTE. Jayaram Chandrasekar, Mark A. Hoon, Nicholas J. P. Ryba y Charles S. Zuker en *Nature*, vol. 444, págs. 288-294, 16 de noviembre, 2006.

Supertormenta solar

Sten F. Odenwald y James L. Green

La repetición de la supertormenta solar de 1859 se convertiría en un Katrina cósmico. Causaría daños cuantiosos en los satélites artificiales, las redes eléctricas y las radiocomunicaciones

Al caer la noche del domingo 28 de agosto de 1859 se vieron en los cielos de media América auroras boreales. Vívidas cortinas de luz cubrieron el firmamento desde Maine hasta la punta de Florida. Los cubanos, sorprendidos, las observaron justo sobre sus cabezas. Los cuadernos de bitácora de los barcos que navegaban cerca del ecuador describen unas luces rojizas que se quedaban a medio camino del cenit. Muchos pensaron que sus ciudades ardían. Los instrumentos de tierra fueron registrando pequeños cambios en el magnetismo del planeta hasta que de repente la medida se salió de la escala. Aparecieron entonces corrientes espurias en los telégrafos; en Baltimore, los técnicos trabajaron desde las ocho de la tarde hasta las diez de la mañana sólo para transmitir una noticia de prensa de apenas 400 palabras.

Poco antes del mediodía del jueves 1 de septiembre, el astrónomo inglés Richard C. Carrington tomaba unos bocetos de un curioso grupo de manchas solares, curioso por el enorme tamaño de las regiones oscuras. A las 11:18 horas fue testigo de un intenso destello de luz blanca procedente de dos puntos del grupo de manchas. Llamó en vano para que alguien fuese a ver el espectáculo, que duró unos cinco minutos escasos: los astrónomos, solos en su observatorio, rara vez encuentran con quien compartir la emoción. Diecisiete horas más tarde, una segunda oleada de auroras boreales convirtió la noche en día en América, desde el norte hasta Panamá. Se podía leer el periódico a la luz rojiza y verdosa de las auroras. Los mineros de oro de las Montañas Rocosas se levantaron y desayunaron a la una de la madrugada, creyendo que el Sol estaba saliendo en un día nublado. Los sistemas telegráficos dejaron de funcionar en Europa y Norteamérica.

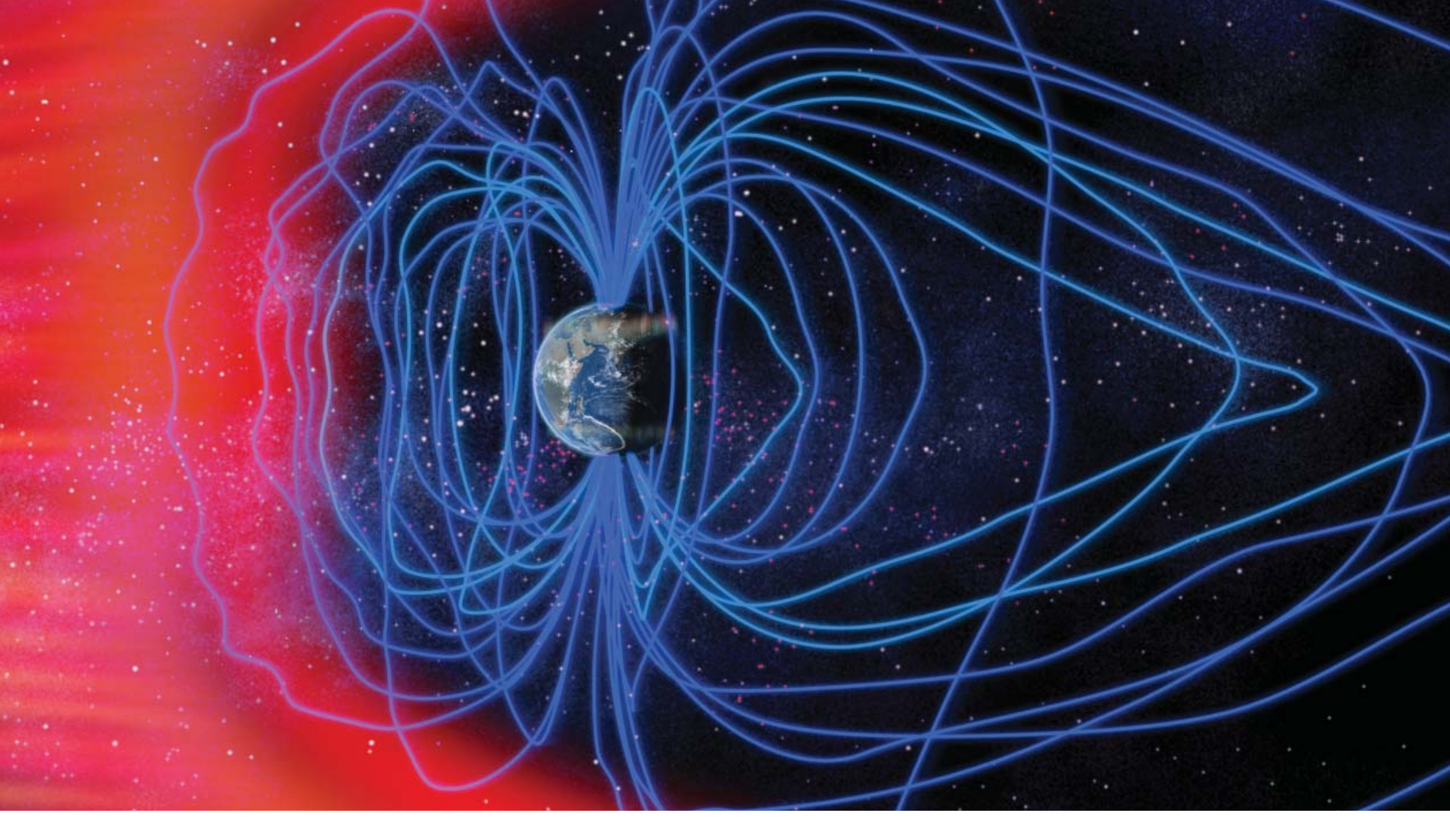
Los medios de comunicación de entonces pidieron a los científicos una explicación del fenómeno, pero en aquellos días se sabía muy poco de las auroras. ¿Se trataba de materia meteorítica procedente del espacio, de luz reflejada por los icebergs polares o de una especie de relámpagos que se producían a mucha altura? Sería precisamente la Gran Aurora de 1859 la que conduciría a un nuevo paradigma. En el número de *Scientific American* del 15 de octubre se lee que "ahora está completamente establecida la conexión entre las luces del norte y las fuerzas de la electricidad y del magnetismo". Desde entonces, se ha despejado toda duda de que las auroras boreales tienen su origen último en sucesos violentos del Sol, que lanzan al espacio grandes nubes de plasma que perturban temporalmente el campo magnético de nuestro planeta.

Si la tormenta de 1859 no tuvo mayores consecuencias fue sólo porque nuestra civilización tecnológica se encontraba por entonces en su infancia. Si hubiera ocurrido hoy día, los satélites artificiales habrían sufrido grandes daños, las comunicaciones por radio se habrían interrumpido y habría habido apagones eléctricos en continentes enteros; el servicio sólo se habría restablecido pasadas varias semanas. Una tormenta de tal magnitud ocurre apenas

CONCEPTOS BASICOS

- La supertormenta de 1859 fue la más insidiosa de las que queda constancia: se vieron auroras boreales a latitudes muy bajas, hasta en el Caribe, se descontrolaron las brújulas magnéticas y fallaron los sistemas de telégrafo.
- Los testigos de hielo indican que estas ráfagas de partículas solares tan intensas suceden una vez cada 500 años, pero incluso tormentas que se repiten cada 50 años pueden abrasar los satélites, bloquear las radios y ocasionar apagones continentales.
- Los costes que ello supondría justifican un seguimiento solar sistemático y una protección más robusta de los satélites y de las redes de suministro eléctrico.

PAT RAWLINGS SAIC



una vez cada 500 años. Tormentas con la mitad de esa intensidad golpean una vez cada 50 años, más o menos. La última, acontecida el 13 de noviembre de 1960, causó perturbaciones geomagnéticas por todo el globo y apagones de radio. Algunos cálculos indican que, si no estamos preparados, los costes directos e indirectos de otra supertormenta igualarían al de los mayores huracanes o terremotos.

La más grande

El número de manchas solares, así como otros datos de la actividad magnética solar, sube y baja a lo largo de un ciclo de 11 años. El ciclo actual comenzó el pasado mes de enero; en los próximos cinco años, tras la pausa actual, la actividad solar será cada vez mayor. En los últimos 11 años han estallado en la superficie del Sol 21.000 fulguraciones y 13.000 nubes de gas ionizado (de plasma). Estos fenómenos, colectivamente llamados tormentas solares, surgen del estado de continua agitación de los gases solares. En cierto sentido, son tormentas terrestres a mayor escala, con la importante salvedad de que los gases solares están acompañados de campos magnéticos que les dan forma y proporcionan energía. Las fulguraciones son análogas a las tormentas de rayos: son explosiones de partículas de altas energías e intensos rayos X debidas a cambios del campo magnético, de una escala pequeña conforme a una vara de medir solar (cubren miles de kilómetros). Las eyecciones de masa coronal son análogas, en cambio, a los huracanes; se trata de gigantescas burbujas magnéticas con diámetros de millones de kilómetros que arrojan nubes de miles de millones de toneladas de plasma al espacio a velocidades de varios millones de kilómetros por hora.

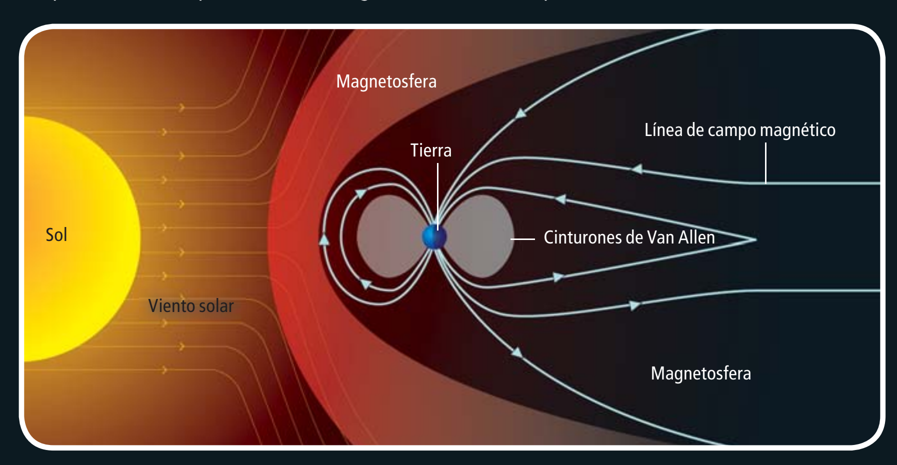
La mayoría de esas tormentas encienden auroras boreales en los cielos árticos. Comparadas con los fenómenos meteorológicos, equivaldrían a un chaparrón. En ocasiones, sin embargo, el Sol libera un vendaval. Nadie que viva hoy ha experimentado una supertormenta en su máximo esplendor, pero sí existen huellas de tormentas pasadas en algunos lugares sorprendentes. Kenneth G. McCracken, de la Universidad de Maryland, descubrió en los núcleos de hielo de Groenlandia y de la Antártida repentinos aumentos de la concentración de los gases de nitrato atrapados; resultaba que entre estas anomalías y las ráfagas de partículas solares que ya se conocían había una correlación. La anomalía de nitrato de 1859 despunta como la mayor en los últimos 500 años; su intensidad equivale a la suma de los episodios más importantes desde hace 40 años.

A pesar de su violencia, no parece que la supertormenta de 1859 haya sido cualitativamente diferente de sucesos menos extremados. Los autores, junto con muchos otros investigadores, hemos reconstruido lo que ocurrió entonces gracias al registro histórico y extrapolando los datos de las tormentas de los últimos decenios, observadas ya por los satélites modernos.

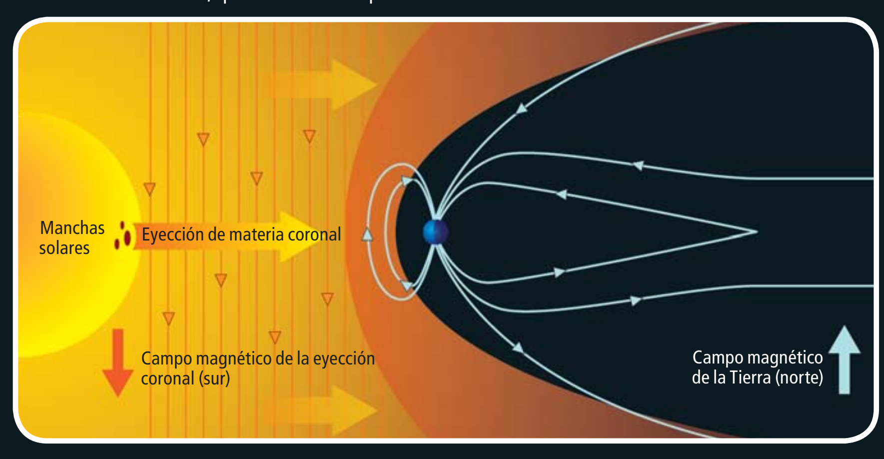
1. Tormenta que se avecina. La condición previa a la supertormenta de 1859 consistió en la aparición en el Sol de un gran grupo de

El impacto de una eyección de masa coronal

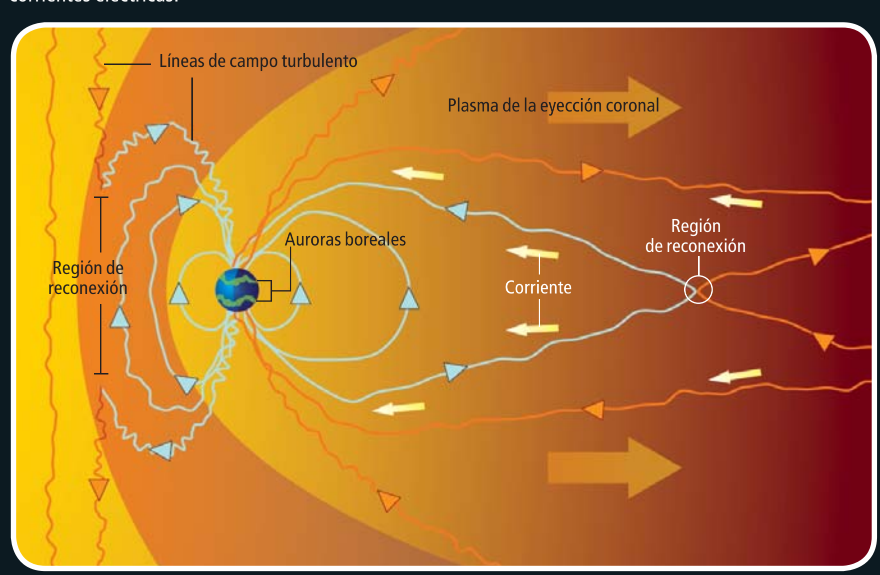
CONDICIONES NORMALES: En condiciones normales, el campo magnético terrestre desvía la corriente de partículas dotadas de carga procedentes del Sol: se vacía un volumen lacriforme, la magnetosfera. Por el lado que mira al Sol, el borde o magnetopausa llega a unos 60.000 kilómetros de la Tierra. Este campo atrapa, además, a las partículas en una región con forma de rosquilla: los cinturones de Van Allen.



LOS PRIMEROS ESTADIOS DE UN IMPACTO: Cuando una eyección de masa coronal —una burbuja de gas altamente ionizado— lanzada por el Sol alcanza la magnetosfera, ésta se comprime. En los casos más extremos, como el de las supertormentas, puede incluso empujar la magnetosfera dentro de los cinturones de Van Allen, que entonces desaparecen.



RECONEXION MAGNETICA: El gas solar posee su propio campo magnético; cuando pasa por nuestro planeta, provoca turbulencias en el campo magnético de la Tierra. Si el campo del gas solar apunta en dirección opuesta al terrestre, los dos campos pueden reconectarse. Se libera entonces una energía magnética que acelera las partículas, lo cual enciende brillantes auroras boreales e induce poderosas corrientes eléctricas.



La supertormenta de 1859

Los autores han reconstruido lo acontecido en 1859 basándose parcialmente en sucesos similares (aunque menos intensos) observados con satélites modernos. TUC es el Tiempo Universal Coordinado; básicamente, el tiempo medio de Greenwich.

26 de agosto
Aparece un gran grupo de manchas cerca de los 55 grados de longitud oeste del Sol; posiblemente se lanzó la primera eyección de masa coronal.

28 de agosto
La eyección coronal alcanza la Tierra de refilón, debido a la longitud solar desde la que fue emitida; su campo magnético estaba orientado al norte.

28 de agosto, 07:30 TUC
El Observatorio Magnético de Greenwich detecta una alteración, que señala una compresión de la magnetosfera.

28 de agosto, 22:55 TUC
Comienza la fase principal de la tormenta, con grandes perturbaciones magnéticas, cortes telegráficos y observaciones de auroras en latitudes tan al sur como los 25 grados norte.

30 de agosto
Finalizan las perturbaciones geomagnéticas de la primera eyección coronal.

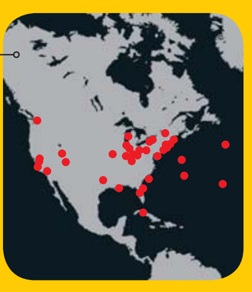
1 de septiembre 11:15 TUC
El astrónomo Richard C. Carrington, entre otros, observa una fulguración de luz blanca en el Sol; el gran grupo de manchas solares ha rotado hacia una longitud 12 grados oeste.

2 de septiembre 05:00 TUC
Los observatorios magnéticos de Greenwich y Kew observan unas perturbaciones seguidas de un caos geomagnético; llega a la Tierra en 17,5 horas la segunda eyección coronal, que ha viajado a 2380 kilómetros por segundo y con un campo magnético orientado hacia el sur; las auroras boreales aparecen incluso a latitudes magnéticas de 18 grados norte.

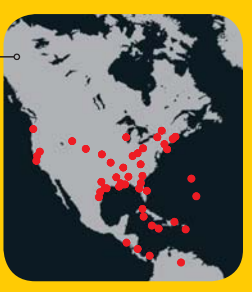
3-4 de septiembre
Acaba la fase principal de las perturbaciones ocasionadas por la segunda eyección coronal; siguen viéndose auroras dispersas, si bien de una intensidad decreciente.


MANCHAS SOLARES


EYECCION DE MATERIA CORONAL


AVISTAMIENTO DE AURORAS


FULGURACION DE RAYOS X


AVISTAMIENTO DE AURORAS

manchas cerca del ecuador, casi en el pico del ciclo solar. Las manchas eran de tal magnitud, que se percibían incluso a simple vista (con la protección adecuada). En el momento en que se produjo la eyección inicial de masa coronal, el grupo de manchas estaba frente a la Tierra: nuestro planeta se encontraba en el punto de mira solar. Aunque no se requiere, sin embargo, tanta puntería por parte del Sol. Para cuando la materia coronal alcanza la órbita terrestre, se despliega en una extensión de 50 millones de kilómetros, miles de veces el tamaño de nuestro planeta.

2. Primera ráfaga. La supertormenta liberó dos eyecciones de masa coronal. La primera tardó el tiempo habitual en llegar a la Tierra: de 40 a 60 horas. Por los datos de los magnetómetros de 1859, parece que el campo magnético del plasma expulsado era helicoidal. En el primer contacto con la Tierra, apuntaba al norte. Con esa orientación reforzaba el campo magnético propio de la Tierra; los efectos se minimizaron. La eyección coronal comprimió la magnetosfera terrestre —la región del espacio próxima a la Tierra donde el campo magnético de nuestro planeta domina al del Sol— y se registró en los magnetómetros de las estaciones de superficie como lo que ahora se llama un "inicio repentino de tormenta".

Por lo demás, hasta ahí pasó inadvertida. A medida que la corriente de plasma seguía bañando la Tierra, su campo fue girando lentamente. Transcurridas 15 horas, en lugar de reforzar el campo magnético terrestre se oponía a él: las líneas de nuestro planeta, que apuntaban hacia el norte, y las de la nube de plasma, dirigidas ahora hacia el sur, entraron en contacto. La consiguiente reconexión de las líneas de campo creó una forma más sencilla y liberó grandes cantidades de energía almacenada. Fue entonces cuando empezaron las interrupciones telegráficas y las auroras boreales. Al cabo de uno o dos días, el plasma terminó de pasar por la Tierra y el campo geomagnético de nuestro planeta regresó a la normalidad.

3. Fulguración de rayos X. Las eyecciones de masa coronal suelen coincidir con una o más fulguraciones intensas. La supertormenta de 1859 no constituyó ninguna excepción. La fulguración visible observada por Carrington y por otros el 1 de septiembre debió de tener temperaturas de casi 50 millones de Kelvin. Es muy probable que no sólo emitiera luz visible, sino también rayos gamma y rayos X. No se ha observado fulguración solar más brillante; la energía depositada en la atmósfera del Sol hubo de ser inmensa. La radiación alcanzó la Tierra tras viajar unos ocho minutos y medio; llegó bastante antes que la segunda eyección coronal. De haber habido en aquella época radios de onda corta, habrían quedado inutilizadas por la energía depositada en la ionosfera terrestre, la capa alta de gas ionizado que refleja las radioondas. La energía de los rayos X calentó la alta atmósfera de la Tierra, que se expandió entre decenas y cientos de kilómetros.

4. Segunda ráfaga. Antes de que el viento de plasma solar ambiental tuviera tiempo de rellenar la cavidad dejada atrás por la primera eyección coronal, el Sol disparó una segunda eyección. Con muy poco material interpuesto que se le resistiese, alcanzó la Tierra en 17 horas. Esta vez, el campo magnético del plasma apuntaba al sur en el momento del impacto. El caos geomagnético no se hizo esperar. Fue tal la virulencia, que comprimió la magnetosfera terrestre hasta sólo unos 7000 kilómetros, comparados con los 60.000 kilómetros que suele extenderse. Quizá penetrase incluso en la alta estratosfera. Como el cinturón de radiación de Van Allen que rodea nuestro planeta desapareció temporalmente, se descargaron gigantescas cantidades de protones y electrones en la atmósfera. Estas partículas podrían haber sido la causa de las intensas

LLUEVEN PROTONES

Al igual que los huracanes y las tormentas de rayos de la Tierra, las tormentas solares pueden causar estragos en una multitud de formas.

- Las fulguraciones solares son explosiones que emiten ráfagas de radiación. Aumentan la absorción de las ondas radio en la capa D de la ionosfera terrestre e interfieren la señal de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y la recepción de ondas cortas. Al calentar las capas altas de la atmósfera, las fulguraciones las expanden y aumenta la fuerza de arrastre sobre los satélites.

- Las eyecciones de masa coronal son burbujas gigantes de gas ionizado. Cuando la Tierra es alcanzada por la estela de una de estas burbujas, se inducen corrientes eléctricas que viajan por las tuberías, los cables y los transformadores eléctricos.

- Los episodios de protones solares son inundaciones de protones de alta energía que en ocasiones acompañan a las fulguraciones y a las eyecciones coronales. Pueden borrar datos de los circuitos electrónicos y suministran una dosis extra de radiación a los astronautas y a los pasajeros de las líneas aéreas.



LAS AURORAS BOREALES —ésta se fotografió en Njardvik, Islandia— son el resultado más vistoso de la actividad solar. Semejante espectáculo de luz se debe a la colisión entre partículas portadoras de carga, en su mayoría procedentes del viento solar, y gases de las capas altas de la atmósfera terrestre. La diversidad cromática refleja la emisión de elementos químicos diferentes. Apenas si se ven auroras fuera de las regiones polares, salvo durante una gran tormenta solar, que las encendería hasta en los Trópicos.

PAGINA IZQUIERDA: MELISSA THOMAS (*ilustración*); INSTITUCION CARNEGIE DE WASHINGTON (*manchas solares*); SOHO/NASA (*eyección de masa coronal y fulguración solar*); EN ESTA PAGINA: ARCTIC-IMAGES/CORBIS (*aurora*)

auroras boreales rojas que se observaron en parte importante del mundo.

5. Protones energéticos. La fulguración solar y la fuerte eyección coronal aceleraron los protones hasta energías de 30 millones de electronvolt y mayores. En el Artico, donde el campo magnético terrestre presenta la menor protección, estas partículas entraron hasta una altitud de unos 50 kilómetros, depositando energía extra en la ionosfera. De acuerdo con Brian C. Thomas, de la Universidad Washburn, la lluvia de protones de la supertormenta de 1859 redujo la capa de ozono estratosférico en un 5 por ciento. Se necesitaron cuatro años para que recuperase lo perdido. Los protones más poderosos, con energías por encima de mil millones de electronvolt, reaccionaron con los núcleos de nitrógeno y de oxígeno del aire; se produjeron así neutrones y se generaron anomalías en las cantidades de los nitratos. Una lluvia de neutrones alcanzó la superficie —a esto se le llama ahora "suceso a ras de suelo"—, pero no existía por entonces aparato alguno que pudiera detectar el ataque. Por fortuna, no resultó perjudicial para la salud.

6. Corrientes eléctricas masivas. Mientras las auroras boreales se extendían más allá de las altas latitudes que les eran propias hasta otras mucho más bajas, las corrientes eléctricas de la ionosfera y de las propias auroras inducían en el suelo corrientes intensas que atravesaban continentes. Estas corrientes entraron en los circuitos de los telégrafos. Las descargas de alto voltaje y muchos ampère rozaron el umbral de la electrocución y quemaron varias estaciones de telégrafos.

Satélites quemados

Cuando vuelva a suceder una tormenta geomagnética semejante, las víctimas más claras serán los satélites. Incluso en condiciones normales, las partículas de los rayos cósmicos erosionan los paneles solares y reducen su capacidad de generar energía en un 2 por ciento anual. Las partículas interfieren con la electrónica de los satélites. Muchos satélites de comunicaciones, como el Anik E1 y E2 en 1994 y el Telstar 401 en 1997, se han estropeado o perdido por ese motivo. En cuestión de horas, una tormenta solar fuerte puede hacer perder el equivalente de uno a tres años de vida de un satélite, además de producir cientos de fallos en los sistemas, desde instrucciones erráticas inocuas hasta descargas electrostáticas destructivas.

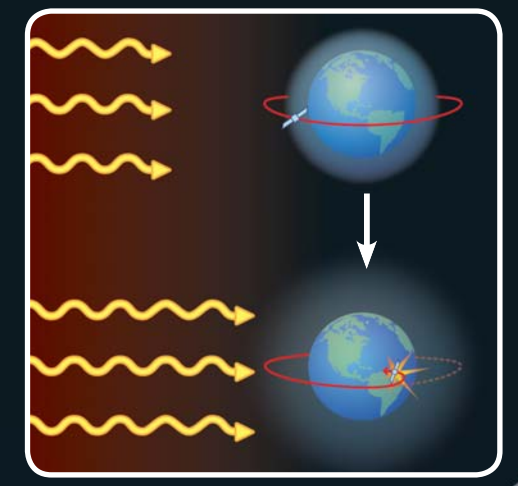
Para estudiar el comportamiento de los satélites de comunicaciones, simulamos mil maneras diferentes en las que podría desarrollarse una supertormenta, con intensidades que oscilaban entre la de la peor tormenta de la era espacial (acontecida el 20 de octubre de 1989) y la supertormenta de 1859. Encontramos que las tormentas no sólo degradarían los paneles solares, sino que ocasionarían también importantes pérdidas de ingresos ligados a su papel en la retransmisión de señales. El coste total ascendería a más de 20.000 millones de dólares. Supusimos que los propietarios de los satélites y sus diseñadores mitigaban las consecuencias dotando a los satélites de una gran cantidad de transpondedores (receptores-transmisores de señales) extra y un margen energético del 10 por ciento. Con supuestos menos optimistas, las pérdidas ascenderían hasta los 70.000 millones, cuantía equiparable a los ingresos anuales de todos los satélites de comunicaciones, sin incluir los daños colaterales que sufrirían los usuarios de los satélites.

Por suerte, los satélites de comunicaciones geosíncronos son muy robustos ante los sucesos que ocurren una vez cada diez años. Su vida media ha crecido desde los cinco años en 1980 a los 17 años de hoy. En cuanto a los paneles solares, se ha sustituido el silicio por una aleación de galio y arsénico en estado de oxidación –3 para aumentar la producción de energía y reducir la masa. Este cambio ha incrementado la resistencia a los rayos cós-

ILUSTRACIONES DE MELISSA THOMAS

El peor caso

La violencia del espacio hace mella en los satélites, incluso en el mejor de los momentos. Pero una supertormenta ocasionaría en unas horas daños que, en condiciones normales, tardarían años en producirse.



Las partículas solares y la radiación expanden la atmósfera terrestre; así aumentan las fuerzas de arrastre (la fricción) a las que se ven sometidos los satélites de órbita baja.

ARCHIVOS BORRADOS

Una supertormenta puede ejercer efectos extraños en los aparatos eléctricos. Los protones de alta energía que alcanzan la superficie producen neutrones que atraviesan el escudo de los satélites y los sistemas de vuelo. (La mayoría de los ordenadores carecen de esos escudos.)

Los extensos estudios de la radiación de fondo que IBM realizó en los años noventa indican que las computadoras sufren del orden de un error provocado por un rayo cósmico por cada 256 megabytes de RAM y mes. De ser así, una supertormenta, con un flujo de radiación sin precedentes, podría originar fallos masivos en las computadoras. Por suerte, la mayoría de los usuarios sólo tendría que reiniciar la máquina.

micos. Además, los operadores de los satélites reciben avisos de tormentas por parte del Centro de Predicción del Tiempo Espacial, de la Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera; así se evita el tener que hacer maniobras complicadas con los satélites u otros cambios cuando llega la tormenta. Sin duda, esta estrategia mermará los estragos de una gran tormenta. Para reforzar los satélites, se podrían engrosar los escudos, disminuir el voltaje de los paneles solares para minimizar el riesgo de descargas electrostáticas incontroladas, añadir sistemas extra de seguridad y utilizar programas de ordenador más potentes que eviten la corrupción de los datos.

Es mucho más difícil protegerse de los efectos de una supertormenta. La energía de sus rayos X expande la atmósfera, con lo que aumentan las fuerzas de arrastre sobre los satélites militares y comerciales en las órbitas de menos de 600 kilómetros de altitud. El Satélite Avanzado para la Cosmología y la Astrofísica, japonés, padeció ese problema durante la tormenta del Día de la Toma de la Bastilla del 14 de julio de 2000. La pérdida de energía y altura que sufrió le condujeron a una reentrada prematura unos meses después. En una supertormenta, los satélites de órbita corta correrían un grave riesgo de abrasarse en la atmósfera terrestre, semanas o meses después.

Sin luz

Nuestros satélites se han diseñado específicamente para que funcionen sometidos a los caprichos del clima espacial. Las redes eléctricas, por el contrario, son frágiles incluso en las mejores condiciones. Cada año, según estimaciones de Kristina Hamachi-LaCommare y Joseph H. Eto, los dos del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley, la economía de los EE.UU. sufre pérdidas de 80.000 millones de dólares por los apagones y las caídas de tensión eléctrica. La disminución en los últimos años del margen energético con que se contaba, ha reducido la capacidad de atender a una demanda cada vez mayor.

Durante las tormentas solares surgen nuevos problemas. Los grandes transformadores están conectados eléctricamente a tierra y, por tanto, son susceptibles de que los dañen las corrientes continuas geomagnéticamente inducidas. Estas fluyen por los cables de tierra de los transformadores y pueden llevar los picos de temperatura en las bobinas hasta los 200 grados y más; a esas temperaturas, los refrigerantes se vaporizan y los equipos se funden.

Los autores

Sten F. Odenwald enseña astronomía en la Universidad Católica de América. Trabaja en SP Systems y, de forma esporádica, en el Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA. Sus principales áreas de investigación son la radiación cósmica infrarroja y la fenomenología del clima espacial. **James L. Green** dirige la División de Ciencias Planetarias de la NASA. Ha estudiado las magnetosferas planetarias y es coinvestigador de la misión magnetosférica IMAGE.

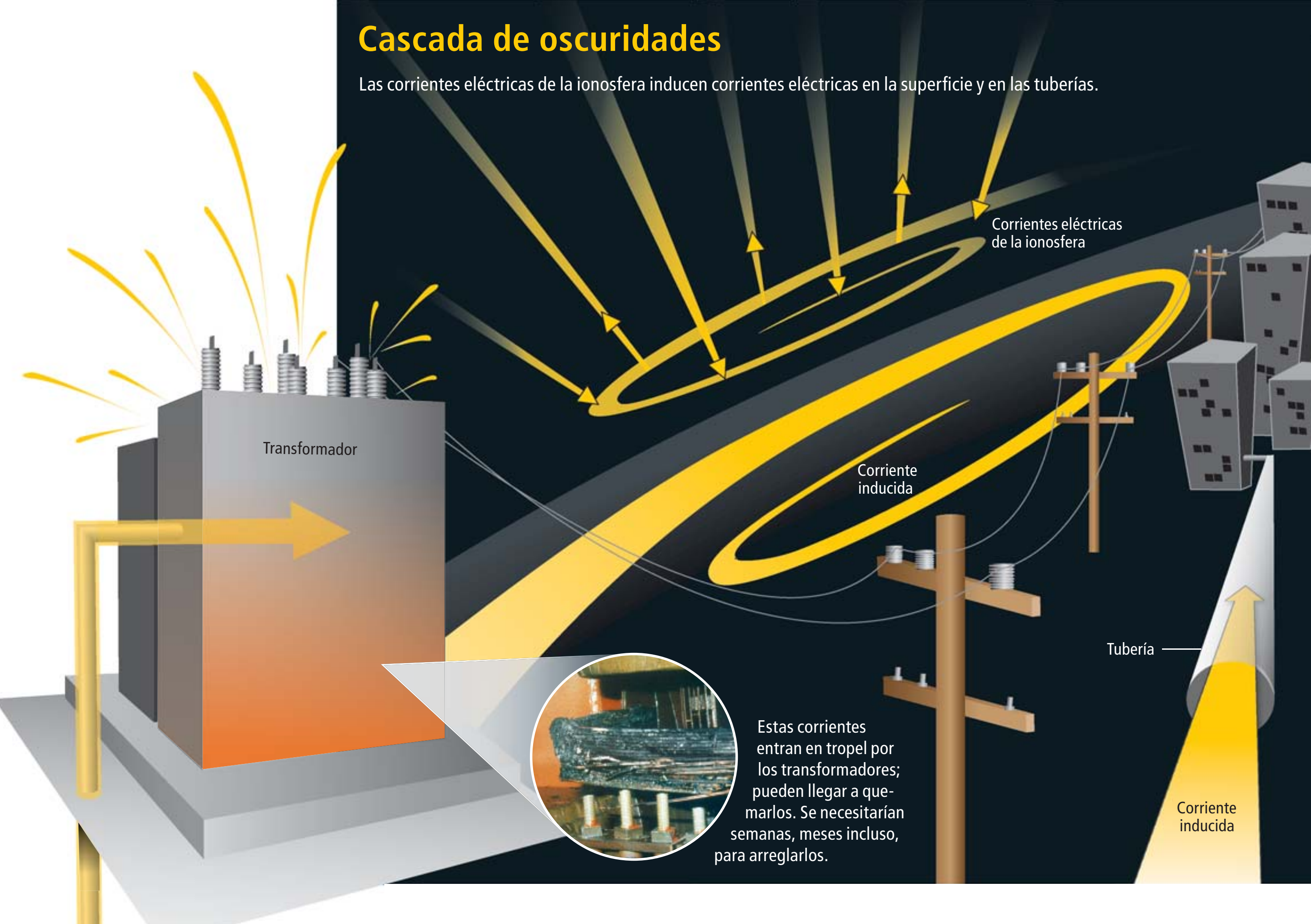
JPL (*micrografía*)



¿Cómo podemos prepararnos?

Si se avecinase una tormenta, cabría hacer lo siguiente:

- Que los operadores de satélites desconecten las secuencias de órdenes críticas. Ya desencadenada la tormenta, deberían vigilar los satélites e invalidar cualquier orden espuria.
- Que los usuarios de GPS recurran a sistemas de navegación alternativos.
- Que los astronautas no realicen paseos espaciales.



¿DOSIS EXCESIVAS PARA LOS ASTRONAUTAS?

Una buena noticia sobre las supertormentas es que la dosis de radiación que impartirían a los astronautas en órbitas bajas en torno a la Tierra no pondría en peligro su vida. Lawrence W. Townsend, de la Universidad de Tennessee, ha calculado que la dosis de una supertormenta es de 20 rads, equiparable al límite impuesto por la NASA para una exposición acumulada de 30 días.

Por otra parte, este suceso único implica una radiación superior a la que se recibiría en un entorno natural sobre la superficie de la Tierra en el transcurso de 70 años. Los pasajeros de las líneas aéreas podrían recibir una dosis equivalente a la de una tomografía.

Aun cuando los transformadores evitaran tal destino, la corriente inducida podría hacer que los núcleos magnéticos se saturaran durante la mitad del ciclo de la energía alterna y se distorsionara la forma de las ondas de 50 o 60 hertz. Parte de la energía adoptaría frecuencias que el equipo eléctrico no podría filtrar. Los transformadores no funcionarían a un ritmo adecuado. Puesto que una tormenta magnética afecta a los transformadores de todo un país, la red de la regulación del voltaje podría venirse abajo rápidamente. Las redes funcionan ya tan cerca de sus límites, que no hace falta mucho para perturbarlas.

De acuerdo con los estudios de John G. Kappenman, de la Corporación Metatech, la tormenta magnética del 15 de mayo de 1921 habría provocado un apagón en media Norteamérica de haber ocurrido hoy. Una tormenta aún mayor, como la de 1859, habría inutilizado la red por completo. Otros países industrializados son también vulnerables, pero Norteamérica se enfrenta a un peligro mayor por su proximidad al polo norte magnético terrestre. El daño físico causado a los transformadores sería seguramente de magnitud tal, que la recuperación total y el recambio de los componentes llevaría semanas, incluso meses. Kappenman declaró ante el Congreso en el año 2003 que "socorrer a más 100 millones de personas afectadas es sin duda muy arduo".

Una supertormenta también interferiría las señales de radio, incluidas las del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y otros sistemas afines. Las fulguraciones solares no sólo perturban la ionosfera, por la que se propagan las señales temporales, sino que aumentan además el ruido en las frecuencias de los GPS. Se inducirían errores de más de 50 metros en las posiciones: inutilizaría los GPS en muchas aplicaciones militares y civiles. Ya se ha dado el caso de una pérdida de precisión: durante la tormenta del 29 de octubre de 2003, en la que se apagó el "Sistema de Mejora de Area Ancha", una red de radio que mejora la precisión de los cálculos de posición de los GPS. Los vuelos comerciales tuvieron que utilizar sistemas alternativos en pleno vuelo.

Las partículas de altas energías interferirían las comunicaciones por radio de los aviones, especialmente a mucha altura. *United Airlines* vigila continuamente las tormentas espaciales;

ILUSTRACIONES DE MELISSA THOMAS; CORTESIA DE JOHN KAPPENMAN (*transformador fundido y mapa de EE.UU.*)



Toda la costa este de EE.UU. y gran parte del resto de ese país perdería el suministro de corriente eléctrica. Este mapa presenta los posibles apagones ocasionados por una gran tormenta como la de 1921, con corrientes inducidas en la superficie de 20 volt por kilómetro. Aún hay que construir modelos que determinen los efectos que en las redes eléctricas tendría una supertormenta como la de 1859.

en varias ocasiones ha tenido que desviar los vuelos polares hacia latitudes menores para librarlos de las radiointerferencias. Una supertormenta podría obligar a reorganizar cientos de vuelos, y no sólo los que pasan por el polo, sino también los que atraviesan Canadá y el norte de los Estados Unidos. Las condiciones adversas podrían durar una semana entera.

Preparativos

Por paradójico que resulte, el aumento de la vulnerabilidad de la sociedad a las tormentas solares coincide con un creciente desinterés público. Hemos estudiado hace poco las informaciones relativas al clima espacial que aparecieron en los periódicos desde los años cuarenta del siglo XIX. Observamos que en torno a 1950 se produjo un cambio sustancial. Antes de esa fecha, las tormentas magnéticas, las fulguraciones solares y sus efectos salían en las primeras páginas de los periódicos. El *Boston Globe* publicó un titular de cinco centímetros, "Los EE.UU. golpeados por una tormenta magnética", el 24 de marzo de 1940. Sin embargo, desde 1950 se destierran las informaciones de ese tenor a las páginas interiores.

Las tormentas menores terminan siendo costosas. En 2004, Kevin Forbes, de la Universidad Católica de América, y Orville Chris St. Cyr, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA, examinaron el mercado del suministro eléctrico en el período que va del 1 de junio de 2000 al 31 de diciembre de 2001, y llegaron a la conclusión de que las tormentas solares aumentaron el precio de la venta al por mayor de la electricidad en aproximadamente unos 500 millones de dólares. Al mismo tiempo, el Departamento de Defensa de los EE.UU. ha calculado que los daños de las disfunciones solares en los satélites gubernamentales suman unos 100 millones de dólares anuales. Las compañías de seguros han pagado casi 2000 millones de dólares entre 1996 y 2005 para cubrir los daños y las pérdidas de satélites comerciales, algunos de los cuales se precipitaron por culpa de un clima espacial adverso.

Sería mejor contar con sistemas fiables que alertaran de la llegada de las tormentas solares y geomagnéticas. Con un aviso adecuado, los operadores de los satélites pueden evitar ciertas maniobras y vigilar cualquier anomalía que, sin una respuesta rápida, pudiera convertirse en una emergencia crítica. Los pilotos de las líneas aéreas deben prepararse para un plan ordenado de desvíos del vuelo. Los operadores de las centrales eléctricas pueden vigilar las componentes más débiles y organizar planes de actuación que minimicen el tiempo en el que la red dejaría de ser operativa.

La NASA y la Fundación Nacional para la Ciencia de Estados Unidos llevan 20 años elaborando medios para predecir el tiempo espacial. El Centro de Previsión del Tiempo Espacial proporciona a diario un informe del tiempo espacial a más de 1000 empresas y agencias gubernamentales. Su presupuesto anual de 6 millones de dólares está muy lejos de los ingresos de casi 500.000 millones de dólares de los beneficiarios de tales predicciones. Pero éstas dependen de un variopinto conjunto de satélites diseñados más con fines científicos que para vigilar el tiempo espacial.

Algunos investigadores opinan que nuestra capacidad de predecir el tiempo espacial viene a ser como la que se tenía de pronosticar el tiempo meteorológico hará sesenta años. Lo que se necesita no es caro: boyas espaciales de larga duración con instrumentos sencillos y comerciales. Queda un largo camino hasta conocer en profundidad la física de las tormentas solares. Si queremos salvaguardar nuestra infraestructura y estar preparados ante la próxima tempestad solar, habrá que redoblar el esfuerzo en la investigación básica, en la creación de modelos y en la predicción del tiempo espacial.

Bibliografía complementaria

THE 23RD CYCLE: LEARNING TO LIVE WITH A STORMY STAR. Sten Odenwald. Columbia University Press, 2001.

TORMENTAS ESPACIALES. James L. Burch en *Investigación y Ciencia*, n.º 297, págs. 56-65; junio, 2001.

LA PARADOJA DE LA CORONA SOLAR. Bhola N. Dwivedi y Kenneth J. H. Phillips en *Investigación y Ciencia*, n.º 299, págs. 14-21; agosto, 2001.

THE GREAT HISTORICAL GEOMAGNETIC STORM OF 1859: A MODERN LOOK. Dirigido por M. Shea y C. Robert Clauer en *Advances in Space Research*, vol. 38, n.º 2, págs. 117-118; 2006.

EL ORIGEN DE LAS FULGURACIONES SOLARES. Gordon D. Holman en *Investigación y Ciencia*, n.º 358, págs. 38-45; julio, 2006.

Plasmones superficiales

Debido a su carácter bidimensional y capacidad de almacenar luz en espacios reducidos, los plasmones superficiales son firmes candidatos a desempeñar una función clave en futuros dispositivos ópticos

Francisco J. García Vidal y Luis Martín Moreno

Es evidente que la luz desempeña una función muy importante en nuestras vidas. Por ello ha sido estudiada durante siglos. Merced a ese esfuerzo se ha acumulado un importante bagaje de conocimientos y dispositivos ópticos, muchos de ellos útiles en nuestro desenvolvimiento diario. Sin embargo, no han dejado de aparecer fenómenos relacionados con la luz que dan lugar a nuevos campos de investigación. Este artículo está dedicado a una nueva rama de la óptica, la plasmónica, que estudia las propiedades ópticas de metales nanoestructurados. Aquí expondremos algunas de las propiedades que se están descubriendo. Atraen la atención de físicos, químicos, biólogos y médicos, bien porque quieren entender sus fundamentos, bien para aplicarlas en dispositivos prácticos.

Los metales, además de reflejar la luz, tienen una propiedad óptica menos conocida: bajo ciertas condiciones la luz puede viajar por las superficies metálicas sin alejarse de ellas. Esta es una propiedad muy peculiar, ya que en condiciones normales la luz viaja por las tres dimensiones del espacio y no se la confina con facilidad. En realidad, esta "luz superficial" es una onda más complicada que la luz normal, ya que no consiste sólo en un campo electromagnético, sino que involucra también los electrones libres presentes en los metales. Rufus Ritichie descubrió estas ondas, o "plasmones superficiales" (PS), en los años cincuenta del pasado siglo.

Sin embargo, como los electrones al moverse disipan energía en forma de calor, a los PS se les había tenido siempre por un sumidero de energía y, por lo tanto, como un inconveniente para la utilización de metales en dispositivos ópticos que envíen energía (información) de un lugar a otro. En efecto, tras haber recorrido un PS sólo una décima de milímetro, más de la mitad de la intensidad de luz que lleva se ha disipado ya en forma de calor.

Por tanto, los PS no son muy adecuados si pretendemos valernos de ellos para transportar energía a distancias mayores que las décimas de milímetro. Pero en ciertas aplicaciones ese margen ya no es tan pequeño. La continua miniaturización de los componentes electrónicos ha creado la necesidad de transportar información a escalas de unas pocas micras (una micra o micrometro, μm, es una milésima de milímetro, mientras que un nanómetro es una milésima de micra). Al mismo tiempo, la técnica que ha dado lugar a esa miniaturización nos permite crear estructuras (hendiduras, protuberancias, agujeros, etcétera) en las superficies metálicas en escalas micrométricas o nanométricas con una precisión y control antes inaccesibles, abriéndose la posibilidad de controlar a voluntad las propiedades de los plasmones superficiales.

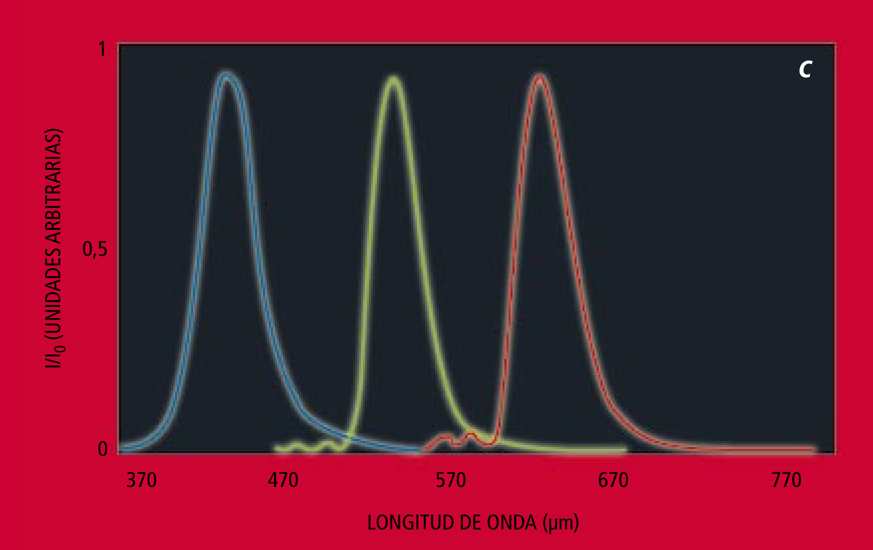
Las investigaciones de numerosos grupos repartidos por todo el mundo persiguen generar eficientemente estos PS, moverlos por la superficie a nuestra voluntad (creando para ellos los equivalentes a lentes, divisores de haz, guías de onda, transistores y circuitos), y extraer la energía que llevan, probablemente en forma de luz o de señal eléctrica, para poder transportarla a mayores distancias. En un campo emergente tan activo como la plasmónica, es difícil saber dónde aparecerán las aplicaciones más interesantes. Aquí nos vamos a centrar en las tres áreas de la óptica de metales que hoy en día parecen más prometedoras: la transmisión de luz a través de agujeros pequeños, los sensores moleculares basados en plasmones superficiales y los circuitos plasmónicos.

CONCEPTOS BASICOS

- La luz puede quedar atrapada en la superficie de un metal. Esa "luz superficial" involucra también a los electrones libres de la superficie metálica. Este tipo más complejo de onda recibe el nombre de "plasmón superficial".
- Si en una lámina metálica se perfora un conjunto ordenado de agujeros, el metal que queda entre ellos se vuelve transparente a la luz de determinadas longitudes de onda. En esta "transmisión extraordinaria de luz" es crucial el papel de los plasmones superficiales.
- Los plasmones tendrían en los circuitos ópticos su aplicación más esperanzadora. Pero, por ahora, la principal son los sensores moleculares basados en la resonancia de plasmones superficiales.

a

b



CORTESIA DE THOMAS W. EBBESEN, *Universidad Louis Pasteur de Estrasburgo*

1. LA TRANSMISION EXTRAORDINARIA DE LUZ consiste en que un metal perforado con agujeros se vuelve transparente a la luz de ciertas longitudes de onda. En el panel (*a*) se muestra una imagen, obtenida con un microscopio electrónico, de una lámina de plata de 320 nanómetros (nm) de espesor perforada por un conjunto periódico de agujeros dispuestos en una red cuadrada (17 × 17). El diámetro de los agujeros es de 280 nm y el período de la red, de 750 nm. Los paneles (*b*) y (*c*) muestran una imagen y un espectro de transmisión, respectivamente, asociados a tres redes de diferentes períodos (azul: 300 nm; verde: 450 nm; rojo: 550 nm). Los espectros de transmisión de las tres redes periódicas (*panel c*) poseen picos resonantes para estos valores de la longitud de onda: azul en 436 nm, verde en 538 nm y rojo en 627 nm.

Transmisión extraordinaria de luz

Un agujero en una pantalla opaca es uno de los elementos ópticos más simples que quepa imaginar. El proceso del paso de la luz a través de un agujero pequeño ha sido objeto de curiosidad y utilizado tecnológicamente desde la Antigüedad. En la cámara oscura, el elemento fundamental era un agujero minúsculo que proyectaba la imagen (invertida) en una superficie. El primer estudio científico de la transmisión de luz a través de una apertura circular fue llevado a cabo por Francesco Maria Grimaldi en el siglo XVII. Fue uno de los primeros análisis dentro de la nueva disciplina de la óptica clásica.

En realidad, todos tenemos experiencia de cómo se comporta la luz al pasar por agujeros. Por lo común, se trata de perforaciones mucho mayores que la longitud de onda de la luz. Pero cuando las dimensiones de los agujeros son menores que la longitud de onda de la luz, nuestra intuición falla y aparecen fenómenos de otra naturaleza. Por una parte, como encontró teóricamente Hans Bethe durante los años cuarenta, el porcentaje de luz de longitud de onda λ que atraviesa un agujero circular de diámetro d en una lámina metálica es proporcional a $(d/\lambda)^4$. Es decir, si el diámetro del agujero es mucho menor que la longitud de onda, la eficiencia en el proceso de transmisión resultará pequeñísima.

La luz tampoco emerge del agujero como esperaría la intuición. Mientras que en agujeros grandes sale en la misma dirección por la que incidió (como en las rendijas de una persiana), en el caso de agujeros con tamaños menores que la longitud de onda la escasa luz que se transmite se reparte por igual en todas las direcciones.

Ambas propiedades —baja transmisión y distribución isótropa de la radiación transmitida— constituyen un freno para muchas aplicaciones, que requieren la iluminación intensa de áreas muy pequeñas.

Un gran avance en la superación de la baja transmisión a través de agujeros pequeños se produjo en 1998. El grupo experimental dirigido por Thomas Ebbesen, entonces en los laboratorios del grupo de empresas NEC en Princeton, descubrió que una colección ordenada de agujeros pequeños, perforados en una lámina metálica (*véase la figura 1*), dejaba pasar no sólo toda la luz que incidía sobre ellos, sino más de la que correspondería por su área. Es decir, los agujeros recogían también gran parte de la luz que incidía sobre la lámina metálica, que prácticamente se volvía transparente. Este resultado sorprendente, de *transmisión extraordinaria de luz*, ocurría para ciertos valores de λ (es decir, para ciertos colores) relacionados directamente con el período del conjunto de agujeros. De esta relación se dedujo que el fenómeno de transmisión extraordinaria se hallaba ligado a la presencia de plasmones superficiales, lo que explicaba por qué el fenómeno sólo aparecía en sistemas metálicos.

Nuestro grupo acometió en el año 2001 un estudio teórico que descubrió el mecanismo físico por el cual el metal se volvía transparente. Mostramos que la luz, tras entrar en el agujero, va y vuelve repetidamente antes de salir del todo por la otra cara de la lámina. En cada paso sólo se transmite una pequeña fracción de la luz, pero la suma de muchas pequeñas fracciones puede generar una transmisión muy alta. Como la luz es una onda, esa suma es de cantidades unas veces positivas y otras negativas. Sin embargo, para ciertas relaciones entre las dimensiones de la lámina, los agujeros y la longitud de onda, cada fracción de luz transmitida tiene el mismo signo, en cuyo caso decimos que hay ‘interferencia constructiva’ entre todos los pasos de ese proceso complejo.

El papel de los plasmones es crucial. Recogen parte de la luz que se perdería y, como corren por la superficie, la llevan a iluminar otros agujeros y a que vuelva a formar parte del proceso de transmisión. Es importante que esta luz, transportada por los PS y reiluminadora de otros agujeros, interfiera de forma constructiva con la luz incidente. Como las propiedades de interferencia dependen del camino recorrido, la longitud de onda a la que se produce la transparencia guarda una relación directa con el período de la red de agujeros.

Conductor perfecto

Asociada al fenómeno resonante de la transmisión extraordinaria, se produce una intensa amplificación del campo electromagnético en la superficie metálica (*véase el recuadro* “El campo eléctrico en la transmisión extraordinaria”). Ese hecho posibilita la aparición de efectos no lineales en la transmisión de luz, incluso a intensidades de la luz incidente no muy altas. En condiciones normales, la transmisión es lineal con la intensidad incidente; es decir, a doble intensidad incidente tenemos doble intensidad en la luz transmitida.

Pero hay materiales que modifican la propagación de la luz de una forma que depende de cuánta luz les llega. En el caso que nos ocupa, si se cubre la superficie metálica con un material dieléctrico no lineal, podemos conseguir que la lámina metálica perforada con agujeros actúe como un interruptor o limitador para el paso de la luz.

Imaginemos que se trabaja a una longitud de onda resonante en la que, con una baja

Los autores

Francisco J. García Vidal es catedrático del departamento de física teórica de la materia condensada de la Universidad Autónoma de Madrid. **Luis Martín Moreno** es profesor de investigación del Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón y pertenece al departamento de física de la materia condensada de la Universidad de Zaragoza.

EL CAMPO ELECTRICO EN LA TRANSMISION EXTRAORDINARIA

Los picos de la transmisión de la luz (*gráfica de la derecha*) en una estructura como la descrita en la figura 1 llevan asociada una intensificación del campo eléctrico *E* que se propaga en la dirección *k*. En los paneles *a* y *b* se muestra la amplitud del campo eléctrico en un plano que corta a la lámina metálica de la forma expuesta en el dibujo. Como se observa en ambos paneles, el campo eléctrico es máximo en las superficies y pequeño dentro de los agujeros, lo que demuestra el papel fundamental que desempeñan los plasmones superficiales en el proceso de transmisión extraordinaria de luz. La amplitud del campo eléctrico está referida al valor correspondiente a la luz incidente. Así, en su máximo en la superficie, la intensidad multiplica por 625 (25 x 25) la intensidad de la luz incidente.

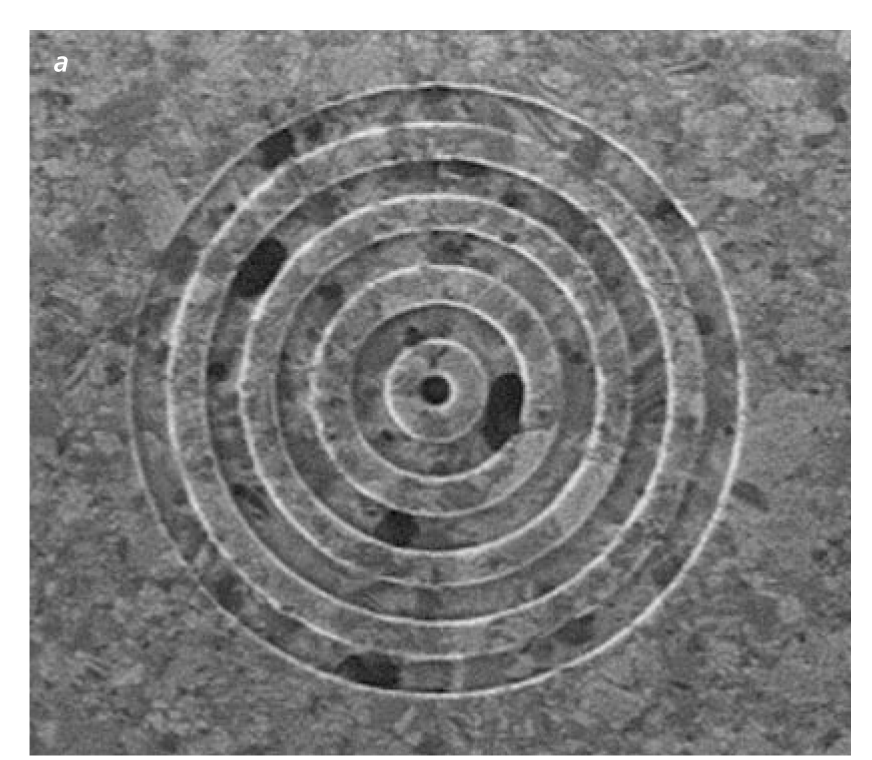
intensidad de luz incidente, se pueden crear PS y, por tanto, obtener alta transmisión. Si aumentamos la intensidad de la luz habrá un momento en que el material no lineal cambie sus propiedades, alterando a su vez la longitud de onda a la que aparecen los PS. Si mantenemos fija la longitud de onda de la luz incidente, dejarán de crearse los PS asociados a esa misma longitud de onda: habrá una drástica disminución de la intensidad de la luz transmitida. Este dispositivo actuaría como una especie de fusible para el paso de la luz.

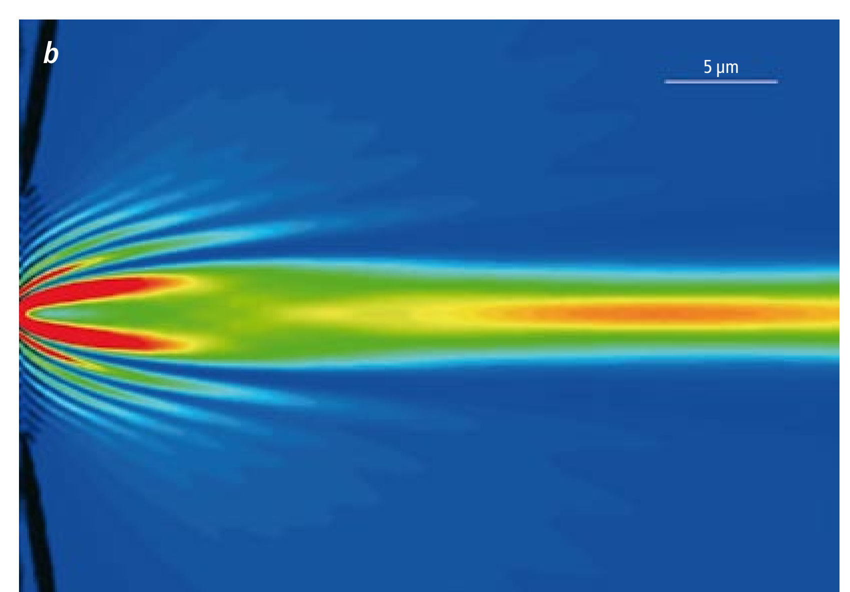
El experimento original de transmisión extraordinaria se realizó en el rango visible del espectro electromagnético, que comprende longitudes de onda entre 0,3 micrometros (azul) y 0,7 micrometros (rojo). Fuera de ese rango de longitudes de onda existen ondas electromagnéticas (ondas de radio, microondas, ondas de terahertz, luz infrarroja, rayos X, etcétera), aunque nuestros ojos no las pueden percibir. En nuestros cálculos del año 2001 encontramos que el fenómeno de transmisión extraordinaria aparecía también en el caso hipotético de que el metal perforado tuviera una conductividad eléctrica infinita; es decir, fuera un "conductor perfecto".

No hay tal en la naturaleza. Sólo existe como idealización teórica, aunque los metales reales iluminados con radiación electromagnética de longitud de onda mayor que 5 micrometros se comportan casi como conductores perfectos. A diferencia de un metal en el rango óptico, en cuyo interior la luz puede penetrar (alrededor de unos 20 nm), un conductor perfecto es impenetrable. Esto tiene unas consecuencias drásticas para la existencia de plasmones superficiales, que requiere la presencia de campos electromagnéticos a ambos lados de la superficie. Por tanto, no hay plasmones superficiales en la superficie de un conductor perfecto.

¿Cuál es, pues, el origen del fenómeno de la transmisión extraordinaria en un conductor perfecto, que no presenta plasmones superficiales? En colaboración con Sir John Pendry, del Colegio Imperial de Londres, descubrimos

FRANCISCO J. GARCIA VIDAL Y LUIS MARTIN MORENO





2. COLIMACION DE LUZ MEDIANTE PLASMONES. En el panel de arriba se muestra una imagen, tomada por un microscopio electrónico, de una estructura de "ojo de buey". Un agujero central (en este caso de 250 nm de diámetro) está rodeado por un conjunto de trincheras concéntricas de 250 nm de anchura y 60 nm de profundidad. La separación entre trincheras es de 500 nm. El espesor de la lámina de plata mide 300 nm. Cuando la luz emerge de esta estructura, lo hace, para un valor determinado de la longitud de onda, en forma de haz colimado, como se muestra en el panel de abajo. En esta imagen se representa la amplitud del campo eléctrico obtenida en una simulación numérica del proceso de colimación.

CORTESIA DE THOMAS W. EBBESEN, FRANCISCO J. GARCIA VIDAL Y LUIS MARTIN MORENO

en 2004 que, si bien la superficie plana de un conductor perfecto no admite la excitación de plasmones, cuando se le inscribe un patrón periódico (por ejemplo, perforándola con un conjunto periódico de agujeros), podrán propagarse por ella ondas superficiales con propiedades muy parecidas a las de los plasmones superficiales que aparecen en un metal en el régimen óptico.

Estas ondas superficiales son las responsables de la transmisión extraordinaria en un conductor perfecto perforado con agujeros. Tienen una virtud fundamental: sus propiedades pueden controlarse a voluntad mediante la geometría de la organización periódica de la superficie.

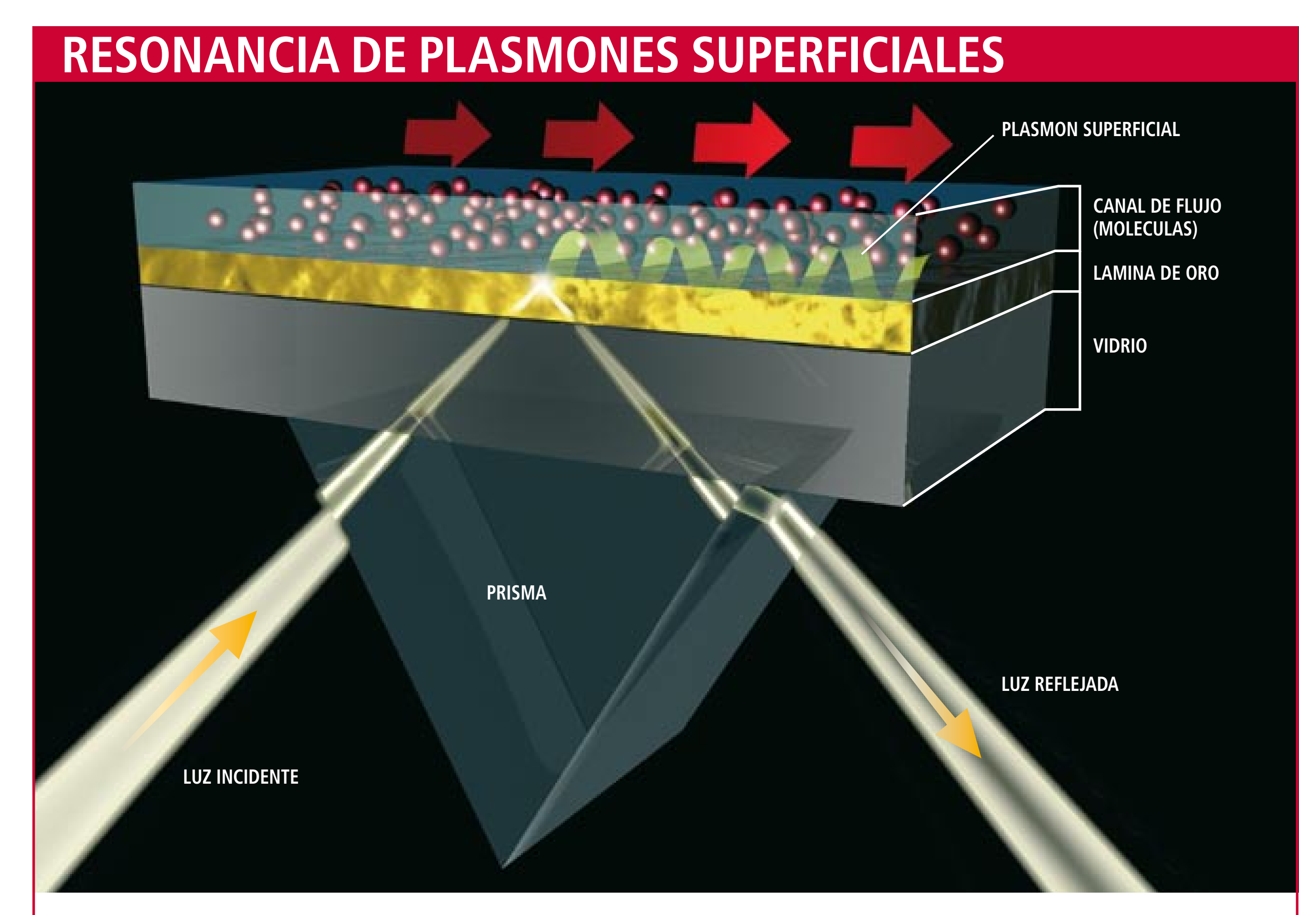
Se permite así una especie de "alquimia" superficial. Antes, sólo podíamos contar con PS en superficies de metales con poca resistencia (y, por tanto, baja absorción de luz), como la plata o el oro. Ahora podemos ir más allá y diseñar metales con propiedades superficiales a la carta, desconocidas en la naturaleza. Por añadidura, nuestro hallazgo teórico extendió la posibilidad de que aparezca la transmisión extraordinaria a metales perforados con agujeros, en el régimen de microondas (donde la distancia entre agujeros es del orden de decenas de milímetros) o en el de terahertz (con una distancia entre agujeros del orden de decenas o centenas de micras).

Colimación asistida por plasmones superficiales

En el experimento original se había conseguido que, sorprendentemente, pasara mucha más luz de la esperada. Pero pasaba a la vez por todos los agujeros. Para iluminar áreas muy pequeñas había que conseguir que la luz atravesase un único agujero. El origen del fenómeno estaba en la interferencia constructiva, apoyada por ondas superficiales. Por lo tanto, si se rodeaba un agujero con una estructura periódica, ésta podría ser reiluminada por los plasmones superficiales y, a su vez, reiluminaría el agujero central, con lo que se aumentaría así la transmisión a través de éste. Esta hipótesis se confirmó experimentalmente en 2002, de nuevo por el grupo dirigido por Thomas Ebbesen, entonces en la Universidad Louis Pasteur en Estrasburgo. Para ello utilizaron las estructuras metálicas denominadas "ojo de buey", donde un agujero central está rodeado por trincheras concéntricas que no atraviesan el metal (*véase la figura 2a*).

Más sorprendente resultó el descubrimiento siguiente: creando una estructura "ojo de buey" en la superficie de salida de la lámi-

RESONANCIA DE PLASMONES SUPERFICIALES



Este es el esquema simplificado del funcionamiento de un dispositivo de resonancia de plasmones superficiales (un detector de moléculas). Se hace que una lámina metálica de oro (con un espesor de unas decenas de nanómetros) crezca sobre un sustrato de vidrio. Por la superficie del metal expuesta al aire se hace circular un fluido compuesto por moléculas, en principio desconocidas. Se manda luz, que pasa por un prisma e incide sobre la superficie del metal, que se halla en contacto con el vidrio. Este haz de luz genera un plasmón superficial, que corre por la superficie de arriba (dentro de ciertas condiciones de ángulo y longitud de onda). Las propiedades de este plasmón superficial vienen determinadas por el tipo de moléculas adsorbidas por el metal en la superficie. Analizando la razón de dependencia de la intensidad de la luz reflejada respecto del ángulo de incidencia y de la longitud de onda utilizada, podemos determinar qué tipo de moléculas fluye por el canal.

FRANCISCO J. GARCIA VIDAL Y LUIS MARTIN MORENO

na metálica, se puede conseguir que la luz transmitida salga formando un finísimo haz (con una divergencia angular de unos 5 grados). De ese modo, se supera la limitación asociada a la radiación isótropa de agujeros pequeños.

El origen físico de este efecto de colimación —la creación de un haz estrecho— reside en los plasmones superficiales. Parte de la luz que emerge por el agujero se emite directamente, pero otra parte importante es transportada por los plasmones superficiales hasta las trincheras. Estas reemiten la luz, produciéndose un fenómeno de interferencia entre la emisión primaria del agujero central y la secundaria, proveniente de las trincheras. Se trata de una interferencia constructiva en ciertas direcciones, dando lugar a la aparición de un haz de luz muy colimado, como se observa en la figura 2b. Variando los parámetros geométricos que definen la estructura —la distancia entre las trincheras y su profundidad— podemos elegir los colores preferentemente emitidos y las direcciones en que se emiten.

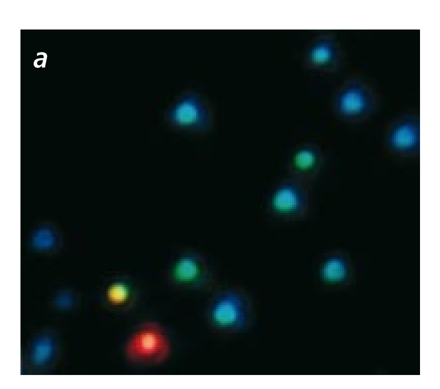
Al librarse la plasmónica de las limitaciones debidas a la baja transmisión y la radiación isótropa, resultan posibles nuevas aplicaciones. Entre ellas figuraría la escritura en regiones menores que la longitud de onda, sea para un almacenamiento óptico de más alta densidad (más información en menos espacio), sea para miniaturizar circuitos integrados mediante litografía óptica de mayor resolución. Asimismo, poder dirigir luz de diferentes colores por diferentes direcciones mediante una lámina metálica de reducidas dimensiones sería de gran ayuda en el diseño de nuevos dispositivos ópticos. Todas estas aplicaciones quizás aparezcan en un futuro más o menos cercano. NEC ya ha desarrollado el fotodetector más rápido del mundo, que tiene forma de "ojo de buey" y se basa en los plasmones superficiales, que

operan como “embudos” para la luz, conforme a la física que hemos descrito aquí.

Sensores moleculares

Sin duda alguna, la aplicación principal de los plasmones superficiales reside hoy en el campo de los sensores moleculares. Existen ya sensores comerciales basados en la “resonancia de plasmones superficiales”. La idea de estos sensores es muy simple. Debido a su fuerte confinamiento en la superficie del metal, los plasmones superficiales se muestran muy sensibles a la presencia de moléculas adsorbidas en la superficie. Un esquema del funcionamiento de estos aparatos se encuentra en el recuadro “Resonancia de plasmones superficiales”. Se deposita sobre un prisma de vidrio una fina lámina de metal (de oro, por lo común), de un grosor de alrededor de 50 nm. Se hace incidir luz desde la región del prisma y se va variando el ángulo de incidencia. Generalmente, la intensidad de la luz reflejada no depende del ángulo de incidencia; mas, para un determinado ángulo, se dan las condiciones necesarias (coincidencia del momento de la luz incidente en la dirección de la superficie y del momento del plasmón superficial) para que se transfiera energía de la luz al plasmón. En ese caso, el plasmón, al generarse, absorbe parte de la energía, reduciéndose la intensidad de la luz reflejada, lo que se mide con una cámara digital de elevadísima resolución espacial y temporal.

Tanto el valor del ángulo al que se produce el mínimo de reflexión como el rango de ángulos en el que la reflexión se reduce, dependen del tipo de material que se halla en contacto con el metal. Calibrando adecuadamente el dispositivo, el análisis de la intensidad reflejada como función del ángulo de incidencia nos aporta información sobre las moléculas cercanas a la superficie, lo que tiene gran interés en química y en biología. Con esta técnica es posible incluso estudiar la evolución temporal de diversas reacciones químicas sobre la superficie.





3. PLASMONES LOCALIZADOS Y VIDRIERAS. En el panel (*a*) se muestra una imagen obtenida mediante una cámara electrónica (Nikon Coolpix 950) de un conjunto de nanopartículas de plata, tal y como se ven en un microscopio de campo oscuro. El tamaño de las partículas es de 40-120 nm. Los colores diferentes corresponden a distintas formas de las partículas. La partícula roja corresponde a una forma triangular, mientras que las pentagonales aparecen con un color verde. El color azul de alguna de las partículas se debe a su esfericidad. (*b*) Vidriera del siglo XIV cuyo color rojo se explica por la presencia de nanopartículas de oro en el interior del vidrio.

CORTESIA DE DAVID SMITH, *Universidad de Duke, EE.UU.*

El objetivo último de los sensores moleculares sería poder detectar la presencia de una molécula y sus propiedades. Los plasmones superficiales tienen también una función muy importante en esta tarea, que actualmente se halla en fase de investigación básica, pero de la que cabe esperar que se comercialice en un futuro no muy lejano. Los plasmones que intervienen aquí no son los plasmones viajeros de los que hemos venido hablando, sino los plasmones localizados que aparecen en partículas metálicas. Cualquier superficie metálica (plana, esférica, cilíndrica o de cualquier otra forma) posee plasmones superficiales. En partículas metálicas, la longitud de onda a la que existen estos plasmones localizados depende del tipo de metal, del tamaño de la partícula y de la forma de ésta. Para esas longitudes de onda, el campo electromagnético se localiza alrededor de la superficie del metal. Cuando luz con longitud de onda igual a la de los plasmones localizados incide sobre la partícula metálica, se produce un efecto resonante, que lleva asociado un aumento enorme de la intensidad del campo electromagnético en las proximidades de la partícula (por comparación con la intensidad de la luz incidente).

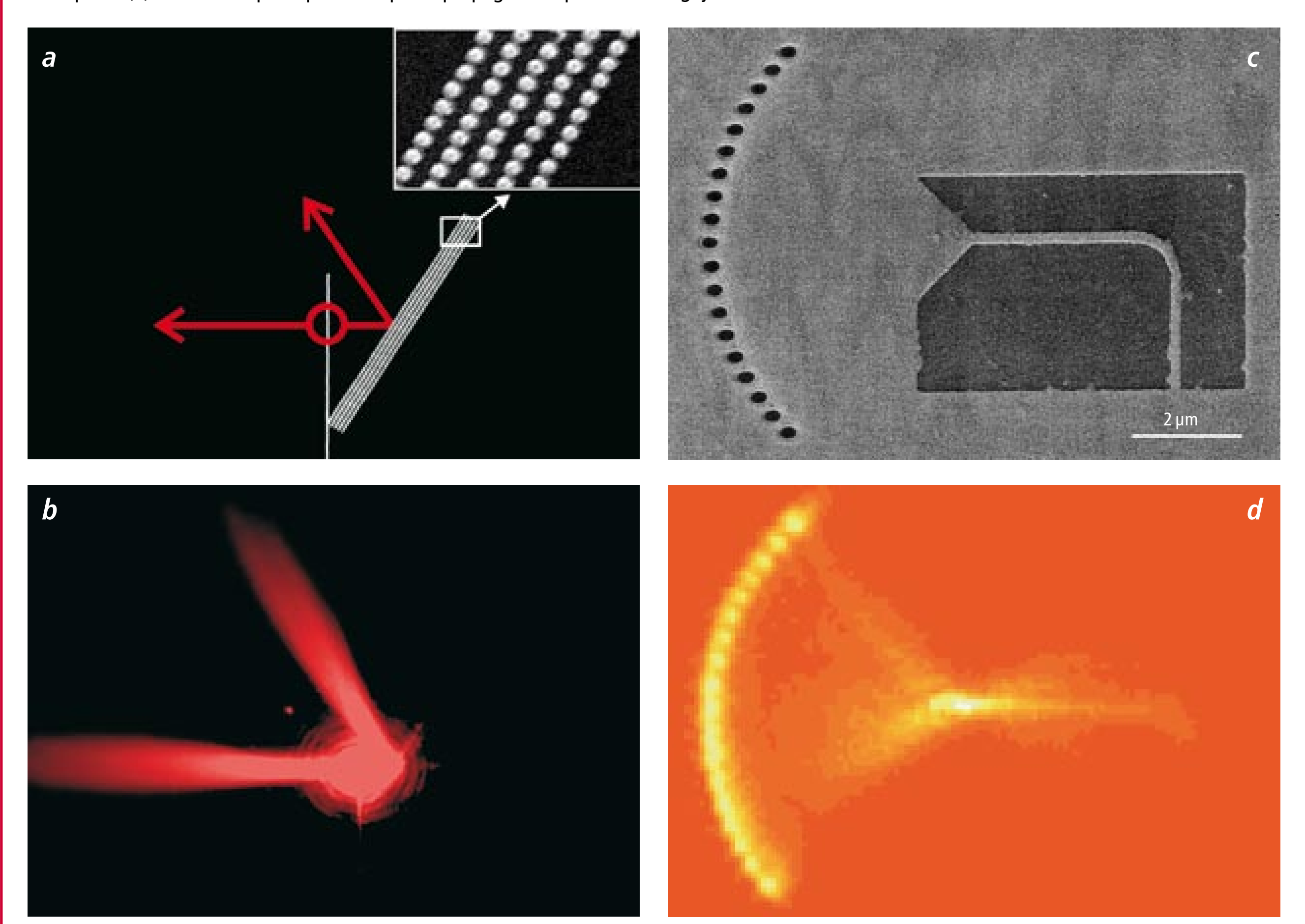
Este fenómeno se aprovecha desde hace siglos para la fabricación de vidrieras. En ellas, algunos colores vienen determinados por la presencia de nanopartículas de oro, o plata, en el interior del vidrio. De la luz blanca que incide sobre la vidriera, nos llega más intensidad en los colores que no son absorbidos por las resonancias plasmónicas de las nanopartículas. Por ejemplo, en la figura 3a el color rojo asociado a alguna de las nanopartículas se debe a que éstas absorben preferentemente luz de color azul y amarillo. A diferencia de los pigmentos utilizados en pintura, las nanopartículas metálicas no se degradan cuando se las ilumina, gracias a lo cual percibimos hoy en día los colores de las vidrieras tal y como se veían cuando las colocaron hace siglos.

Mediante estas resonancias plasmónicas es como se pretende detectar moléculas individualmente. Para ello se recurre a la espectroscopia Raman, así llamada en honor del científico indio que en 1928 descubrió el fenómeno físico en que se basa. Cuando un haz de luz incide sobre una molécula, parte de esa luz se dispersa, y parte es reemitida por la molécula. El espectro de emisión de la molécula (es decir, cómo depende la intensidad de la luz emitida con la longitud de onda) difiere de una molécula a otra; podemos, pues, identificarlas.

Podemos decir que el espectro Raman de una molécula es como su huella dactilar. La cantidad de luz reemitida por la molécula es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo eléctrico

OPTICA EN DOS DIMENSIONES

Se presentan aquí dos ejemplos de cómo se puede hacer óptica en el plano con plasmones superficiales. En el panel (*a*) se muestra una imagen de un *espejo* para plasmones obtenida mediante microscopio electrónico. El espejo consta de cinco hileras de cadenas de nanopartículas de oro de 140 nm de diámetro y una altura de 70 nm. La distancia entre partículas es de 220 nm. La imagen de fluorescencia que aparece en el panel (*b*) manifiesta que el plasmón que se propaga de izquierda a derecha se refleja por entero al incidir sobre el conjunto de las nanopartículas. El panel (*c*) ofrece una imagen, de microscopio electrónico, de una *lente* para plasmones: 19 agujeros (200 nm de diámetro) dispuestos en una semicircunferencia de radio 5 µm se perforan en una lámina de oro. En el panel (*d*) se observa que los plasmones (generados mediante luz con longitud de onda de 532 nm) que emergen por los agujeros se enfocan en el centro de la circunferencia.



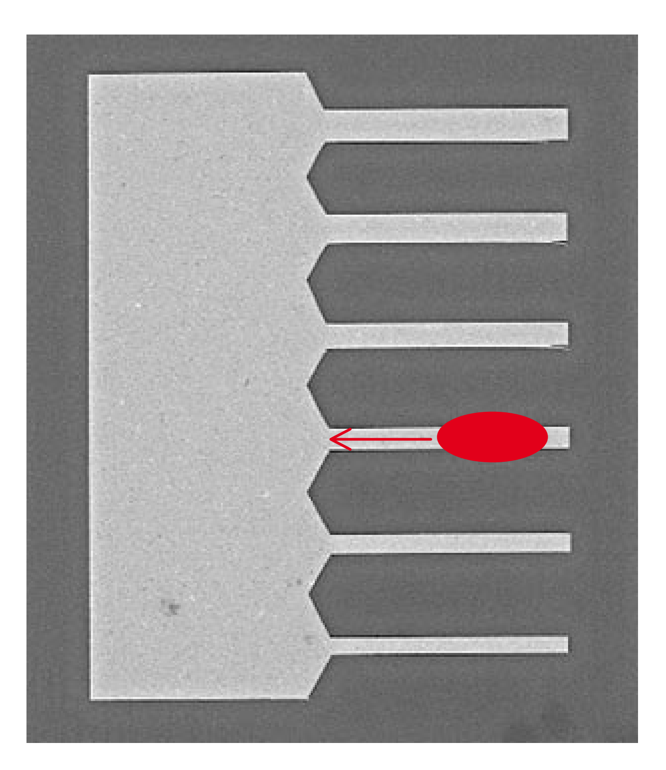
CORTESIA DE JOACHIM R. KRENN, *Universidad de Graz* Y ULRICH WELP, *Laboratorio Nacional de Argonne*

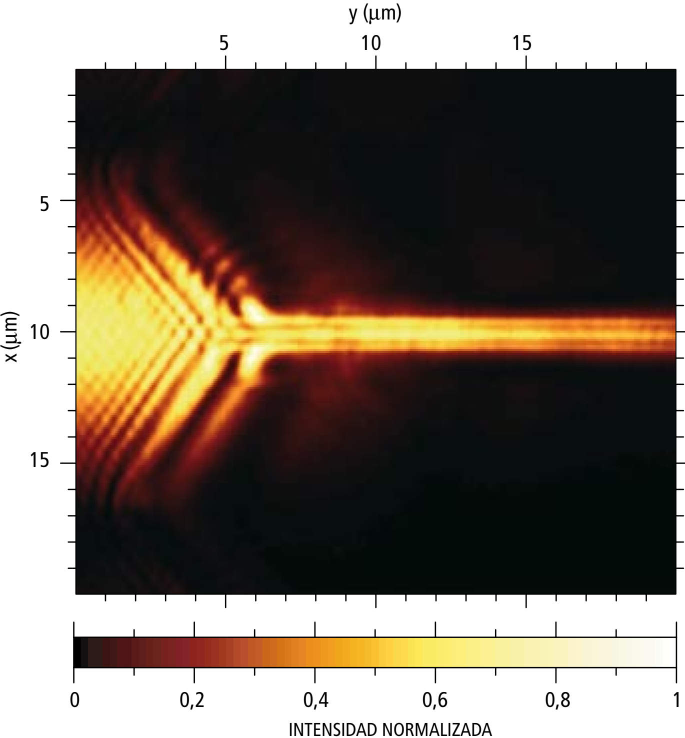
en la posición en la que se encuentra la molécula y al tamaño de ésta. Puesto que hablamos de un tamaño muy pequeño, la señal Raman de una molécula apenas si se detecta, aun cuando se ilumine con láseres muy potentes.

En condiciones normales, para detectar un tipo de molécula mediante un espectro Raman se requiere la presencia de más de un trillón de moléculas. Sin embargo hace 30 años se descubrió que, cuando las moléculas están adsorbidas sobre la superficie de partículas nanométricas metálicas (por lo general de oro o plata), la señal Raman aumentaba en un factor que a veces llegaba a ser de entre 10 y 15 órdenes de magnitud.

La razón de tal aumento se encuentra en la excitación por parte de la luz incidente de los plasmones superficiales. Dicha excitación provoca que el campo eléctrico que siente la molécula sea mucho mayor que el asociado a la luz incidente. Este aumento extraordinario de la señal ha permitido abordar el estudio del espectro Raman de una molécula adsorbida sobre un conjunto de nanopartículas metálicas. En el sistema formado, el acoplo electromagnético entre las nanopartículas hace que el campo eléctrico sea, en la región de contacto entre las mismas, mucho mayor que el asociado a una partícula; resulta entonces posible el análisis espectroscópico de una sola molécula adsorbida en esa región.

A veces una molécula puede presentarse con varias geometrías. Y puesto que la capacidad de absorber radiación de las moléculas depende de su forma, la evolución temporal del espectro Raman nos dará incluso una idea de cómo y cada cuánto cambia una molécula de una geometría a otra. Un conocimiento imprescindible





4. GUIA DE ONDAS PARA PLASMONES. En el panel de la izquierda se muestra una imagen, tomada por un microscopio electrónico, de una lámina de oro de 40 nm de espesor en la que se ha hecho que crezcan cintas del mismo material con un ancho 2,5 μm. La funcionalidad óptica de estas guías de onda se ilustra en la imagen de la derecha, que se ha obtenido mediante microscopía de campo cercano; el procedimiento mide la intensidad del campo eléctrico en la vecindad de la superficie. El plasmón, generado en la zona roja, se introduce en una de las guías y se propaga a lo largo de la misma. Según se aprecia en la figura, el campo eléctrico queda confinado dentro de las cintas de oro, si bien su intensidad va decayendo a medida que se propaga por la cinta.

para entender reacciones químicas, como las que ocurren sin cesar en nuestro organismo. En la actualidad, la búsqueda de la forma que debe tener una superficie metálica para conseguir espectros Raman aún más intensos sigue siendo un activo campo de investigación; esa búsqueda concierne al perfil que ha de tener el metal, la naturaleza de las nanopartículas depositadas, la distancia que debe haber entre ellas, amén de otros.

Optica en dos dimensiones y circuitos plasmónicos

La aplicación técnica que genera mayores expectativas entre quienes estudian los plasmones superficiales son los circuitos ópticos plasmónicos. Los plasmones viajan en una superficie plana a velocidades próximas a las de la luz. Por tanto, los circuitos ópticos miniaturizados serían mucho más rápidos que los circuitos electrónicos ordinarios. Presentarían la ventaja adicional de que podrían transportarse señales ópticas, eléctricas o ambas según conviniera, toda vez que por la superficie de un metal pueden fluir también corrientes eléctricas.

Además, los circuitos plasmónicos serían compatibles con la técnica electrónica disponible, basada en el crecimiento epitaxial (sobre un sustrato de estructura cristalina afín) de metales y semiconductores. Mas, para que estas expectativas se cumplan, habría que mejorar nuestra capacidad de controlar la propagación de los plasmones superficiales. La característica fundamental que permite alterar el movimiento de los plasmones es que, al estar confinados en las superficies metálicas, los PS se ven muy afectados por cualquier modificación de la superficie que encuentren a su paso. Hay decenas de grupos en todo el mundo que se afanan por desentrañar la modificación necesaria de las superficies metálicas para controlar el *flujo* de los plasmones superficiales.

Una de las líneas de trabajo es la creación de elementos ópticos básicos para los plasmones superficiales, es decir, lentes y espejos, como los que modifican la propagación de la luz normal en tres dimensiones. Ya se han elaborado algunos de estos elementos. En la figura a del recuadro “Optica en dos dimensiones” se muestra un espejo para plasmones superficiales, diseñado y construido por el grupo que Joachim Krenn dirige en la Universidad de Graz. Este espejo consta de 5 hileras de nanopartículas de oro (de dimensiones del orden de 0,04 μm) dispuestas periódicamente sobre una superficie de oro. La distancia entre hileras y entre partículas está elegida de modo que un plasmón con longitud de onda de 0,75 μm se refleje totalmente al incidir sobre la estructura.

Por su parte, otro grupo experimental, del estadounidense Laboratorio Nacional de Argonne, ha diseñado una *lente* para plasmones (*véase la figura c del recuadro* “Optica en dos dimensiones”), donde la luz incide sobre un conjunto de 19 agujeros perforados en una lámina de plata. Estos agujeros forman una estructura de media luna con un radio de 5 μm, de manera que los PS que emergen

CORTESIA DE JEAN-CLAUDE WEEBER, *Universidad de Dijon*

por los agujeros se enfocan en una región de dimensiones del orden de tan sólo 0,1 µm, mucho menores que la longitud de onda de la luz incidente, que es de 0,53 µm.

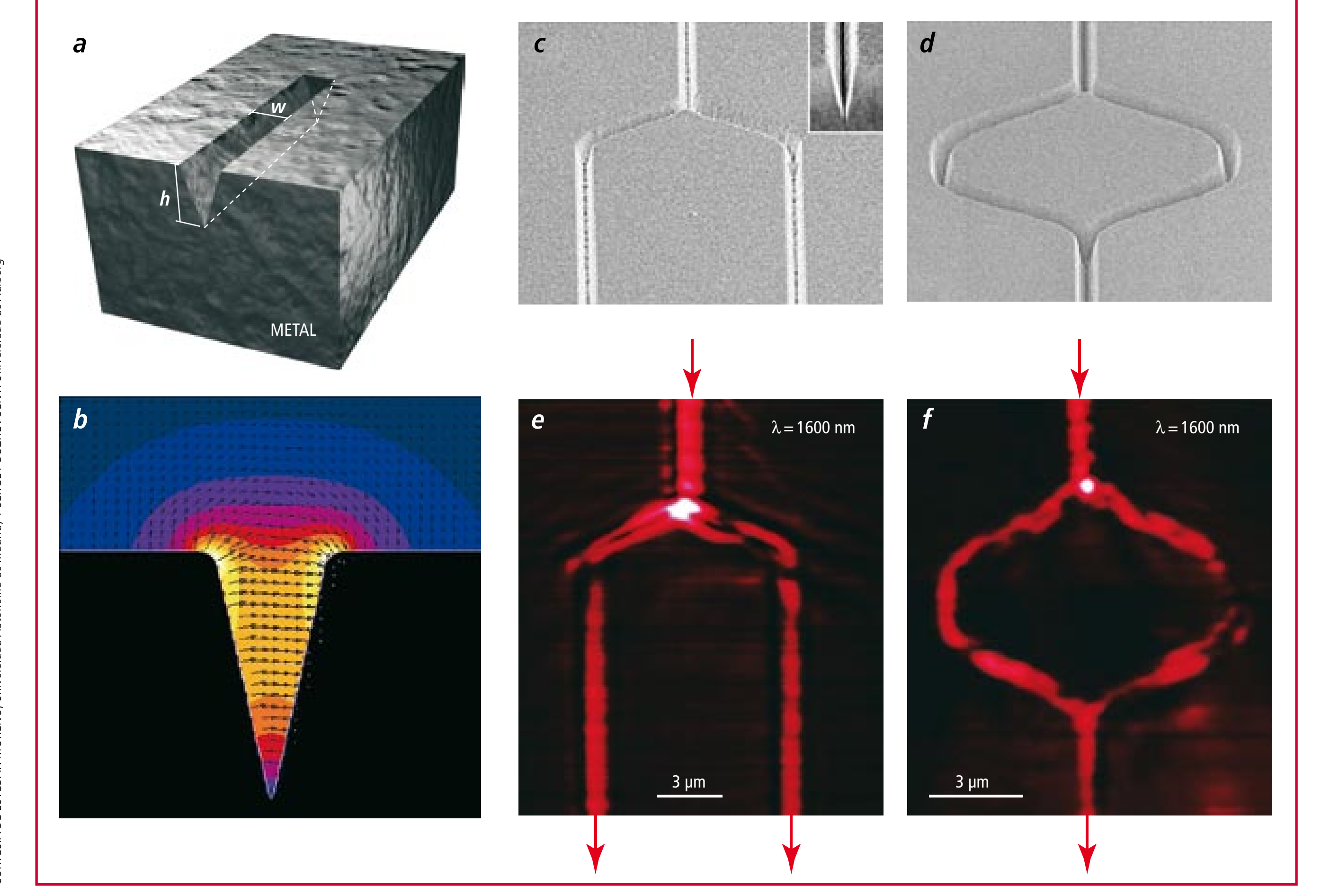
Para crear verdaderos circuitos plasmónicos, los plasmones superficiales deben confinarse no sólo en la dirección perpendicular a la superficie, sino también lateralmente, en la superficie misma. Se trata de lograr que la luz en forma de plasmón superficial se propague con dimensiones laterales del orden de, idealmente, 1 micra. La forma más natural de conseguirlo consistiría en reducir la dimensión lateral del *conducto* metálico por el que viaja el PS (*véase la figura 4*). Pero la investigación experimental ha demostrado que, al reducir la dimensión lateral, se reducen drásticamente las distancias que recorren los PS antes de ser absorbidos (sus "longitudes de propagación").

Como dijimos anteriormente, en una superficie plana bidimensional esa longitud de propagación puede ser de 100 µm. Sin embargo, si la guía metálica tiene una anchura de 1 µm, los plasmones con longitudes de onda en el rango óptico presentarán longitudes de propagación del orden de sólo 3 µm que, al equivaler a sólo a 4-5 longitudes de onda, resultan insuficientes para crear circuitos plasmónicos eficientes.

Hasta hace un par de años se habían intentado diversas estrategias para confinar lateralmente los plasmones superficiales, pero en todos los casos el compromiso entre confinamiento lateral y longitud de propagación de los PS había resultado bastante insatisfactorio.

LUZ QUE SE PROPAGA POR CANALES

En el panel (*a*) se muestra un esquema de un canal en forma de V perforado en una lámina de metal. El estricto confinamiento a que da lugar la excitación de un plasmón superficial de canal se ilustra en el panel (*b*), que manifiesta la amplitud del campo eléctrico para una longitud de onda de 1,4 µm en un canal cuya profundidad es de 1,2 µm y que tiene una anchura de 0,5 µm. En el panel (*c*) se presenta una imagen de microscopio electrónico de un divisor de haces Y, en el que los brazos de la estructura están constituidos por canales en forma de V (*panel superior derecho*). La imagen (*e*) aporta un plasmón superficial de canal de longitud de onda de 1,6 µm que se propaga a lo largo del divisor. (Esta imagen ha sido obtenida mediante un microscopio de campo cercano.) En los paneles (*d*) y (*f*) se ve una imagen de microscopio electrónico de un interferómetro Mach-Zehnder y una imagen del plasmón superficial de canal que recorre la estructura, respectivamente. La longitud de onda en este caso también es de 1,6 µm.



CORTESIA DE ESTEBAN MORENO, *Universidad Autónoma de Madrid*, Y SERGEY BOZHEVOLNYI *Universidad de Aalborg*

Plasmones superficiales de canal

La situación cambió en 2005, cuando el grupo dirigido por Sergey Bozhevolnyi, de la Universidad de Aalborg, consiguió abordar experimentalmente los "plasmones superficiales de canal" y medir sus propiedades. Este tipo de plasmones existe dentro de canales en forma de V horadados en la superficie plana de un metal (*véase el recuadro* "Luz que se propaga por canales"). Pese a su notable grado de confinamiento, su longitud de propagación es comparable a la que corresponde a los plasmones de una superficie plana. Dependiendo del ángulo que define la V y de la profundidad de ésta, pueden aparecer distintos plasmones de canal, que se propagan a diferentes alturas de la V.

Diseñando de modo adecuado la forma del canal —lo que requiere complejos cálculos numéricos— se consigue que sólo exista un modo plasmónico dentro del canal. Habrá así una relación biunívoca entre longitud de onda y velocidad de propagación del plasmón. Una propiedad ésta muy importante en los circuitos ópticos. En efecto, si a una longitud de onda determinada hubiese más de un modo, la luz podría *saltar* de un modo a otro mientras se propaga; la señal luminosa se distorsionaría. Lo mismo le ocurriría a la información asociada a la señal.

Más sorprendente aún es la capacidad de estos plasmones de canal de girar en espacios reducidísimos. En los circuitos ópticos tradicionales, por ejemplo los creados con fibras ópticas, para evitar pérdidas por radiación, la variación de la dirección de la luz se ha de hacer sobre distancias de centenares de longitudes de onda, lo que dificulta la miniaturización de los circuitos. Sin embargo, la computación llevada a cabo por el grupo de David Pile en la Universidad Tecnológica de Queensland, mostró que los plasmones superficiales de canal toman una curva de 90 grados en un espacio de tan sólo 2 o 3 longitudes de onda, sin pérdida apreciable de intensidad.

Todas estas propiedades han sido ya corroboradas experimentalmente. Mediante el bombardeo de una lámina metálica con haces focalizados de iones, que, al chocar con ella, le van desprendiendo átomos de una forma controlada, se crearon canales de una anchura de 0,5 μm y una profundidad de 1 μm. Acoplándolos a fibras ópticas ordinarias, por las que se propagaba radiación electromagnética de $\lambda = 1{,}5$ μm, se generaron plasmones superficiales de canal de esa misma longitud de onda, de gran interés en el campo de las telecomunicaciones.

La propagación del plasmón a lo largo del canal se visualizó mediante un microscopio óptico de campo cercano. En este tipo de instrumento, una fuente de luz nanoscópica, generalmente una punta de fibra óptica con una apertura de menos de 100 nm, barre la superficie de la muestra en la región llamada campo óptico cercano, donde los tamaños son inferiores a la longitud de onda de la luz empleada.

Se comprobó que, según la teoría predecía, la luz estaba confinada en una dimensión lateral de alrededor de 1 μm (dos veces el ancho del canal) y que, a su vez, la longitud de propagación era de 100 μm.

Asimismo, se han construido los primeros dispositivos ópticos basados en las propiedades de los plasmones de superficie de canal. El primero de ellos es un "divisor de haz Y", en el que un canal se separa en dos, formando una estructura con la forma de la letra Y. Se ha comprobado experimentalmente que la intensidad de plasmones superficiales de canal en la base de la letra se divide en dos, fluyendo cada mitad por cada una de las dos ramas de la bifurcación, sin pérdida significativa de luz en la unión.

También se ha fabricado un interferómetro Mach-Zehnder mediante la unión de dos divisores Y. En este dispositivo se hace interferir la luz consigo misma bifurcándola primero y reuniéndola de nuevo. Hoy en día, y a pesar de su corta historia, parece claro que las posibilidades que ofrecen los plasmones superficiales de canal son enormes. Son excelentes candidatos a formar parte de los circuitos fotónicos futuros.

Un futuro brillante

No parece aventurado predecir que, en un futuro más o menos cercano, aparecerán nuevas aplicaciones fundadas en las propiedades especiales de los plasmones superficiales. En Europa, EE.UU. y Asia están en marcha numerosas iniciativas que coordinan los esfuerzos de diversos laboratorios para explotar las enormes potencialidades de los plasmones. Aunque la física es ciencia exacta, nunca se sabe con precisión cuáles de las propiedades fundamentales, que se estudian y entienden desde un punto de vista básico, darán lugar a aplicaciones prácticas con un impacto social y económico. En cuanto a los plasmones superficiales, puede que sus aplicaciones futuras vayan en la línea aquí adelantada o que evolucionen hacia terrenos que ni sospechamos.

En cualquier caso, el conocimiento acumulado sobre los plasmones superficiales durante los últimos años se añadirá a la larga lista de hallazgos y fenómenos descubiertos en el fascinante campo de la óptica durante los últimos siglos.

Bibliografía complementaria

EXTRAORDINARY OPTICAL TRANSMISSION THROUGH SUB-WAVELENGTH HOLE ARRAYS. T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio y P. A. Wolff en *Nature*, vol. 391, págs. 667–669; 1998.

BEAMING LIGHT FROM A SUBWAVELENGTH APERTURE. H. J. Lezec, A. Degiron, E. Devaux, R. A. Linke, L. Martín Moreno, F. J. García Vidal y T. W. Ebbesen en *Science*, vol. 297, págs. 820-822; 2002.

TWO-DIMENSIONAL OPTICS WITH SURFACE PLASMON POLARITONS. H. Ditlbacher, J. R. Krenn, G. Schider, A. Leitner y F. R. Aussenegg en *Applied Physics Letters*, vol. 81, págs. 1762-1764; 2002.

MIMICKING SURFACE PLASMONS WITH STRUCTURED SURFACES. J. B. Pendry, L. Martín Moreno y F. J. García Vidal en *Science*, vol. 305, págs. 847-848; 2004.

CHANNEL PLASMON SUBWAVELENGTH WAVEGUIDE COMPONENTS INCLUDING INTERFEROMETERS AND RING RESONATORS. Sergey I. Bozhevolnyi, Valentyn S. Volkov, Eloise Devaux, Jean-Yves Laluet y Thomas W. Ebbesen en *Nature*, vol. 440, págs. 508-511; 2006.

El descubrimiento del ADN



1. LA DOBLE HELICE DEL ADN se ha convertido en un icono de tal magnitud, que aparece incluso en obras de arte. La estructura se conoció en los años cincuenta del siglo pasado. El ADN, en cambio, se había descubierto mucho antes. A finales de los años sesenta del siglo XIX, el suizo Friedrich Miescher halló esta molécula y la aisló en varios tipos de células.

GIPhotostock Z/ALAMY/*American Scientist*

Son muy pocos quienes conocen al verdadero descubridor del ADN. Aisló la molécula de la vida 75 años antes de que Watson y Crick revelaran su estructura



CONCEPTOS BASICOS

- En la segunda mitad del siglo XIX, el médico suizo Friedrich Miescher descubrió y aisló el ADN.
- Para ello debió aplicar métodos incómodos, desagradables y tediosos; pero su tenacidad y perfeccionismo hicieron que llegara hasta el final.
- La discreción de Miescher y el paso del tiempo terminaron por difuminar su protagonismo en la historia de la biología.

El 26 de febrero de 1869, en la vieja ciudad universitaria de Tubinga, un joven médico suizo allí instalado desde hacía apenas unos meses, Friedrich Miescher, terminaba de escribir una carta a su tío en la que le anunciaba un importante descubrimiento. Había encontrado una sustancia en el núcleo celular cuya composición química era distinta de las proteínas y de cualquier otro compuesto conocido hasta la fecha. Sin comprender las repercusiones de su investigación, Miescher había desencadenado una de las mayores revoluciones científicas que, años más tarde, cambiaría de raíz la manera de entender los fundamentos de la vida y produciría avances médicos inimaginables en su época.

Johann Friedrich Miescher nació en 1844 en el seno de una familia de científicos. Su padre y su tío materno, Wilhelm His, eran médicos de prestigio y profesores de anatomía y fisiología en la Universidad de Basilea. Las visitas de científicos eran frecuentes en su hogar. Las discusiones apasionadas brindaban al joven Miescher la oportunidad de acceder a una gama muy rica de ideas científicas. Ese ambiente hizo que Miescher desarrollara un profundo interés por las ciencias naturales. A la edad de 17 años, empezó en Basilea sus estudios de medicina, que terminó, con 23 años, en 1867.

Al principio pensó en ejercer la profesión, como su padre. Sin embargo, una enfermedad contraída en la infancia había disminuido su nivel de audición, lo que hubiera dificultado el ejercicio. Su fascinación por las ciencias le condujo a la investigación. La convicción de su tío de que las cuestiones pendientes acerca del desarrollo de los tejidos se resolverían sólo sobre las bases de la química llevó a Miescher a estudiar bioquímica.

En la primavera de 1868 se trasladó a Tubinga para trabajar con dos de los científicos de mayor prestigio de la época: Adolf Strecker, especialista en química orgánica, en cuyo laboratorio permaneció durante un semestre, y Felix Hoppe-Seyler, bioquímico y uno de los pioneros de la recién aparecida "química fisiológica". Entre 1860 y 1871, Hoppe-Seyler estuvo al frente de uno de los primeros laboratorios de bioquímica del mundo. Se encontraba ubicado en el interior del castillo medieval de Tubinga, en la parte alta del casco antiguo de la ciudad. El laboratorio de Hoppe-Seyler

ocupaba lo que había sido el lavadero; Miescher trabajaba en la antigua cocina.

Con anterioridad, Hoppe-Seyler había llevado a cabo novedosas investigaciones acerca de las propiedades de la hemoglobina, que tuvieron una gran influencia en estudios posteriores sobre la estructura y función de esta y otras proteínas. En un brevísimo intervalo de tiempo, su laboratorio alcanzó una reputación que traspasó los límites de la ciudad.

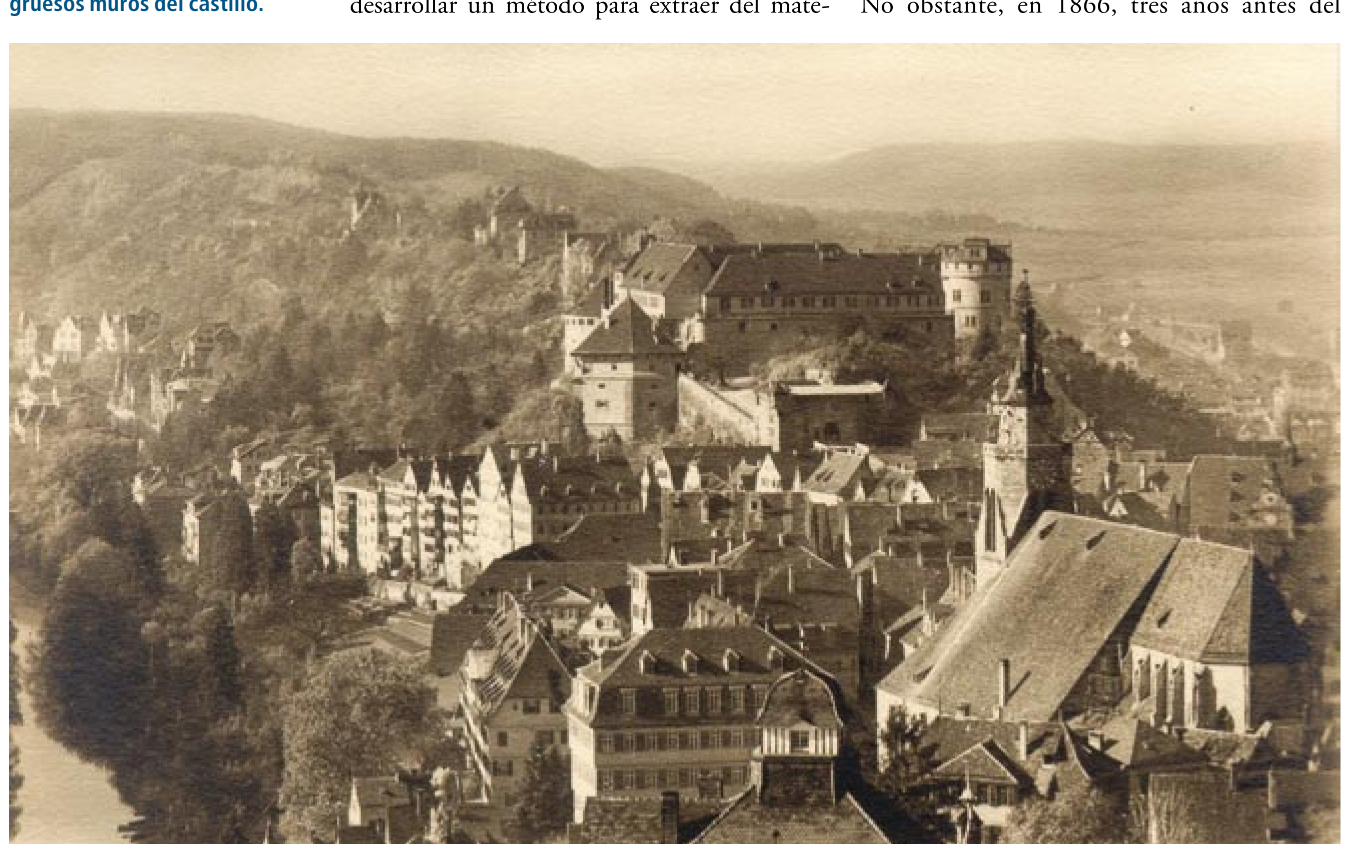
Análisis elementales

Bajo la dirección de Hoppe-Seyler, Miescher comenzó a investigar la composición química de las células. Se centró en los linfocitos. Al tratarse del "tipo de célula más sencilla e independiente", esperaba desentrañar los secretos de la vida celular. Sin embargo, los linfocitos resultaban difíciles de purificar, a partir de los ganglios linfáticos, en las cantidades que requería el análisis químico. Hoppe-Seyler, interesado desde hacía largo tiempo en la naturaleza de la sangre, le sugirió que recurriera a los leucocitos, estrechamente emparentados con los linfocitos. El descubrimiento del ADN tuvo, pues, un comienzo poco estimulante: Miescher aislaba la materia prima para sus experimentos (los leucocitos) a partir del pus de vendajes de heridas que obtenía del hospital quirúrgico de Tubinga. En la época, la supuración abundante de una herida se consideraba un mecanismo del organismo para purgar sustancias nocivas. Apenas se utilizaban antisépticos, por lo que no había problema para conseguir vendajes purulentos en grandes cantidades.

Lo primero que debía hacer Miescher era desarrollar un método para extraer del material quirúrgico los leucocitos. Ensayó varias soluciones salinas, comprobando siempre con el microscopio los resultados. Una vez establecido el protocolo de la extracción, procedió a caracterizar y clasificar las proteínas y los lípidos que aislaba de las células. Lo mismo que muchos de sus contemporáneos, esperaba descubrir el funcionamiento de las células a partir del análisis de sus proteínas, por lo que Miescher acometió la descripción y clasificación de las mismas. Sin embargo, su trabajo estuvo plagado de obstáculos. La diversidad de proteínas celulares era inabordable para los métodos e instrumentos primitivos de la época. Con todo, Miescher detectó una sustancia que mostraba unas propiedades inesperadas. Precipitaba cuando se acidificaba la solución y volvía a disolverse cuando la solución se tornaba alcalina. Sin saberlo, Miescher había obtenido por primera vez un precipitado de ADN.

¿De dónde procedía esa sustancia? Mientras Miescher realizaba la extracción de los leucocitos mediante ácidos, observó que la exposición prolongada de las células al ácido clorhídrico diluido producía un residuo celular semejante a los núcleos aislados. Comprobó que esos núcleos no se teñían de amarillo al añadirles yodo, prueba de que las proteínas se habían extraído. Soluciones débilmente alcalinas provocaban una fuerte hinchazón de los núcleos, pero no los disolvían. Miescher pensó que el precipitado misterioso debía proceder del núcleo.

En esos años, apenas se conocía nada de ese orgánulo. Aunque se había descubierto hacía tiempo, en 1802, su función en la célula era todavía objeto de especulación y controversia. No obstante, en 1866, tres años antes del



2. LA HISTORICA CIUDAD DE TUBINGA, que aparece en esta fotografía tomada hacia 1870, fue siempre un centro del saber. Su inmenso castillo, en el núcleo de la ciudad, fue convertido en un laboratorio de la universidad. Aquí, Friedrich Miescher descubrió una molécula a la que llamó "nucleína", conocida más tarde como ADN. En sus últimos años, Miescher recordaba con nostalgia el amplio espacio del que había dispuesto entre los gruesos muros del castillo.

PAUL SINNER/CORTESIA DEL ARCHIVO MUNICIPAL DE TUBINGA/*American Scientist*

descubrimiento de Miescher, Ernst Haeckel afirmó que el núcleo contenía los factores responsables de la transmisión de los caracteres hereditarios. Esa hipótesis produjo un renovado interés en la función del núcleo. El hallazgo casual de Miescher abrió la puerta a la obtención de más información sobre la naturaleza del orgánulo misterioso.

Antes de poder identificar el precipitado nuclear, Miescher había desarrollado diversos procedimientos para aislar núcleos con un alto grado de pureza. Tras numerosos ensayos, dio con un método eficaz. Lavaba las células varias veces con soluciones frescas de ácido clorhídrico diluido durante un período de varias semanas a "temperaturas invernales" (era muy importante minimizar la degradación del material). Ello provocaba la rotura de las membranas celulares y la liberación de la mayor parte del citoplasma. A continuación, separaba los lípidos mediante la agitación del material en una mezcla de agua y éter. Cuando la mezcla se estabilizaba, los núcleos extraídos se depositaban en el fondo del recipiente, formando un fino granulado. Al añadir una solución alcalina, los núcleos se hinchaban y decoloraban, tal y como había observado en sus primeras preparaciones. La adición de ácido revertía la hinchazón y la aparición de un precipitado blanco. Mediante esos experimentos, Miescher demostró que el precipitado observado provenía de los núcleos, por lo que más tarde lo llamó "nucleína". Ese término se conserva todavía en el actual "ácido desoxirribonucleico".

A pesar del comportamiento poco habitual de la nucleína, Miescher no estaba del todo convencido de que difiriera de una proteína. Por ello acometió nuevos experimentos para ahondar en la naturaleza de tan extraña molécula. Ante todo, se proponía determinar su composición elemental. Para ello necesitaba purificar la nucleína. Para eliminar el citoplasma contaminante, decidió aplicar un método que había descrito Wilhelm Kühne, un año antes, en su manual de química fisiológica. Kühne había descubierto que las células se rompían si se añadía una disolución que contuviera una enzima digestiva, la pepsina, que disuelve el citoplasma sin atacar el núcleo.

Eso era precisamente lo que Miescher necesitaba. Por desgracia, en esa época la pepsina no se comercializaba. Hubo de aislarla por su cuenta. Comenzaba la segunda parte, desagradable también, de su empresa científica: lavó estómagos de cerdo con ácido clorhídrico diluido y filtró los contenidos extraídos con el fin de obtener una solución en bruto de enzimas digestivas de proteínas. Al tratar las células con esta solución, no sólo se digirieron las proteínas, sino que demostró que la nucleína no era una de éstas.

Miescher disponía por fin de un método para aislar ADN. La primera operación consistía en lavar los leucocitos varias veces con alcohol calentado. Con ello rompía las células y eliminaba la mayor parte del citoplasma; además, se disolvían casi todos los lípidos. A continuación, digería el extracto mediante una solución de pepsina. Obtenía así un fino granulado grisáceo. Para eliminar los lípidos residuales, removía el sedimento en éter y nuevamente en alcohol calentado. La "masa nuclear" así purificada presentaba el mismo comportamiento químico que los extractos nucleares aislados mediante los métodos anteriores. Lavaba luego la preparación con soluciones alcalinas (carbonato sódico diluido). Al añadir ácido clorhídrico o acético, obtenía un precipitado floculento, que redisolvía con soluciones alcalinas. De ese modo consiguió la primera preparación limpia de ADN, de pureza suficiente como para embarcarse en el análisis que venía planeando desde hacía tanto tiempo: determinar los elementos que componían la nucleína.

El análisis elemental era uno de los pocos métodos de la época para la identificación de moléculas. El procedimiento incluía el calentamiento de la muestra en presencia de varios agentes químicos que reaccionaban de forma selectiva con los distintos elementos constituyentes. Los productos resultantes se pesaban para determinar la cantidad de cada elemento presente en la muestra. A pesar de tratarse de un proceso harto laborioso y lento —un "trabajo de fábrica", en palabras de Miescher—, lo llevó a cabo.

Miescher había observado, en su método de aislamiento, que la nucleína se comportaba de forma distinta de proteínas y lípidos; las enzimas con capacidad de romper las proteínas no la degradaban, ni podía extraerse mediante solventes orgánicos fuertes. El análisis de su composición elemental le deparó otra sorpresa: además de contener carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno (elementos que se sabía abundaban en las proteínas), la molécula no tenía azufre y presentaba grandes cantidades de fósforo. Este último constituía un hallazgo sorprendente, pues no se conocía ninguna otra molécula orgánica que contuviera fósforo. El resultado convenció a Miescher de que había descubierto un nuevo tipo de sustancia celular fundamental.

Dificultades para publicar

En otoño de 1869, Miescher finalizó los primeros análisis de la nucleína y regresó a Basilea para pasar unas cortas vacaciones. Allí comenzó a redactar su primera publicación científica so-





3. FRIEDRICH MIESCHER en sus últimos años (*arriba*). La fotografía acompañaba la recopilación póstuma de sus trabajos, que llevó a cabo su tío Wilhelm His (*abajo*), una de las personas que más le influyeron y uno de sus mayores valedores.

RALF DAHM (*arriba*); LIGHT, INC./NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE (*abajo*)/*American Scientist*





4. LABORATORIO DE FRIEDRICH MIESCHER en la antigua cocina (*izquierda*) del castillo de Tubinga. Estaba escasamente equipado; el aparato imponente que se muestra en la fotografía servía para destilar agua. Miescher obtenía las células que usaba para aislar el ADN del pus que empapaba las vendas recogidas de un hospital quirúrgico local. Los hospitales no solían adoptar por entonces medidas higiénicas, por lo que era fácil conseguir pus (*derecha*, hospital de Tubinga a comienzos del siglo XX).

CORTESIA DE LA UNIVERSIDAD DE TUBINGA (*izquierda*); CORTESIA DEL ARCHIVO MUNICIPAL DE TUBINGA (*derecha*)/*American Scientist*

bre el análisis de la composición química de los leucocitos, que incluía el descubrimiento de la nucleína. En el manuscrito, se mostraba seguro sobre la importancia de su hallazgo y ponía la nueva sustancia a la misma altura que las proteínas. Tras las vacaciones, volvió al laboratorio, pero no en Tubinga, sino en la Universidad de Leipzig. Con el fin de ampliar su formación, decidió abarcar otros temas. Empezó a trabajar en el laboratorio de Carl Ludwig, para investigar, entre otras cuestiones, las vías nerviosas de la médula espinal que transmiten el dolor. Aunque Miescher abordó las nuevas tareas con la meticulosidad que le caracterizaba, no lo hizo con el mismo entusiasmo que había sentido por el proyecto de Tubinga.

Durante sus primeros meses en Leipzig, Miescher terminó el borrador de su primera publicación. Acabó de redactarla poco antes de la Navidad de 1869. Lo enviaría a Hoppe-Seyler, para que le diera su aprobación. El 23 de diciembre escribía en carta a sus padres: "Sobre mi mesa hay un paquete sellado y con una dirección puesta. Es mi manuscrito, para cuyo envío he hecho ya todos los preparativos necesarios. Voy a mandarlo a Hoppe-Seyler, a Tubinga. El primer paso para publicarlo está dado, ya que Hoppe-Seyler no lo rechazará".

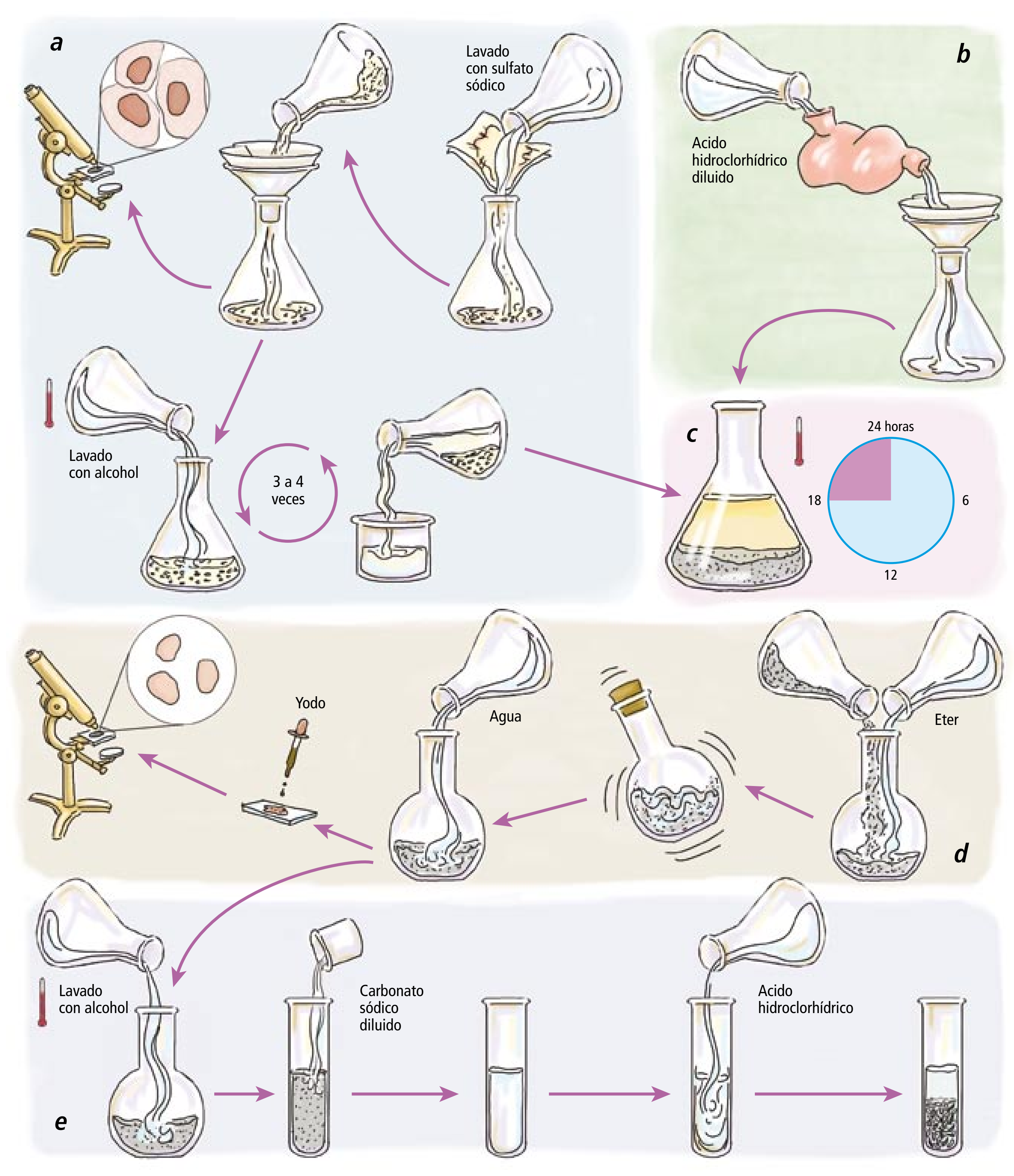
Hoppe-Seyler no lo rechazó. Sin embargo, desconfiaba de tan novedosos resultados. Quiso comprobarlos por sí mismo antes de publicarlos. Esa actitud no resulta sorprendente, pues hacía poco que en el laboratorio de Hoppe-Seyler se había sostenido un largo debate en torno a la existencia, en el tejido cerebral, de una molécula que contenía fosfato. Hoppe-Seyler se mostraba escéptico ante un joven científico que afirmaba haber descubierto una nueva molécula fundamental. Además, el manuscrito de Miescher iba a publicarse en el *Medicinisch-chemische Untersuchungen* ("Investigaciones Médico-Químicas"), revista que dirigía Hoppe-Seyler, por lo que se veía obligado a ser especialmente crítico.

A Miescher no le quedaba más remedio que resignarse a meses de ansiosa espera hasta que Hoppe-Seyler comprobara sus resultados. Aunque la opinión de Hoppe-Seyler fue positiva, sus análisis iniciales sobre la composición elemental de la nucleína difirieron de los de Miescher. Eran diferencias sin importancia, pero retrasarían el proceso de edición. Hoppe-Seyler le propuso a Miescher enviar el manuscrito a otra publicación, pero el joven prefirió esperar a que los resultados se comprobaran y ver su trabajo en la revista de su antiguo mentor.

La situación empeoró al estallar la Guerra Franco-Prusiana. En julio de 1870, una federación de estados alemanes se vio implicada en un amargo conflicto con Francia. La atención y los recursos se desviaron de la ciencia académica. La preocupación de Miescher por el retraso de la publicación de su manuscrito aumentaba día a día. Quería realizar su tesis de *habilitación* en la Universidad de Basilea para poder ser contratado allí como profesor. Además, temía que otros descubrieran la nucleína y lo publicaran antes que él.

Escribió varias veces a Hoppe-Seyler para desbloquear la situación. Desesperado por tan largo retraso, contempló la posibilidad de mandar su trabajo a otra revista; le pidió a Hoppe-Seyler que le devolviera el manuscrito. En octubre de 1870, tras un año de suspense, Miescher recibió la respuesta a sus cartas. Hoppe-Seyler había confirmado los resultados sobre la nucleína e intentaría publicar el trabajo en el siguiente número de su revista. La carta incluía asimismo alguno de sus hallazgos sobre la materia para que Miescher le hiciera las observaciones oportunas.

Satisfecho al saber que su trabajo vería pronto la luz, Miescher envió enseguida sus



5. EL PROCEDIMIENTO DE FRIEDRICH MIESCHER para aislar la nucleína era meticuloso y tedioso. Debía llevarse a cabo a bajas temperaturas, muy incómodas, para evitar la degradación de las muestras. Fueron su visión científica y su intensa dedicación las que apuntalaron el éxito de Miescher. Primero lavaba con una solución diluida de sulfato sódico las vendas empapadas de pus; así extraía los leucocitos, que posteriormente filtraba para eliminar las fibras de algodón. Después de que las células reposaran varias horas en el fondo del recipiente, las examinaba al microscopio para asegurarse de que permanecían intactas. A continuación, lavaba las células varias veces con alcohol calentado, lo que provocaba su rotura y la eliminación de la mayoría de los lípidos (*a*). Por otra parte, lavaba con ácido clorhídrico diluido estómagos de cerdo para extraer pepsina, una enzima que digería las proteínas (*b*), con la que calentaba y agitaba repetidamente las células entre 18 y 24 horas. En esa fase, las células formaban un sedimento granulado, fino y grisáceo, de núcleos aislados, separado de un líquido amarillo pálido (*c*). Removía los núcleos en éter varias veces para eliminar cualquier resto de lípidos; tras lavarlos con agua y teñirlos con yodo, los examinaba al microscopio. Una falta de tinción indicaba que las proteínas se habían eliminado con éxito (*d*). Después de otra serie de lavados con alcohol calentado, Miescher comenzaba la comprobación. Cuando añadía a los núcleos carbonato sódico diluido (solución alcalina), se hinchaban y se tornaban translúcidos. Si añadía ácido, obtenía un precipitado insoluble en forma de copos: la nucleína o ADN (*e*).





6. TUBO DE ENSAYO (*derecha*) de hace unos 140 años, conservado en la Universidad de Tubinga. Contiene nucleína que Miescher aisló de esperma de salmón mientras trabajaba en la Universidad de Basilea. Los filamentos largos y pálidos de la otra fotografía (*izquierda*) corresponden a moléculas de ADN aisladas en la actualidad.

EDWARD KINSMAN/*Photo Researchers, Inc. (izquierda)*; ALFONS RENZ/*Universidad de Tübingen (derecha)/American Scientist*

comentarios a Hoppe-Seyler. Pocas semanas después recibió las pruebas de su primera publicación; iban acompañadas de una carta del director en la que lamentaba la gran cantidad de errores tipográficos que contenía, debido a la dificultad de los impresores para descifrar la caligrafía de Miescher.

Por fin, a principios de 1871 se publicó el manuscrito de Miescher, que encabezaba el sumario de ese número de la revista de Hoppe-Seyler. La publicación contenía otros dos artículos sobre la nucleína: uno escrito por uno de sus alumnos, en el que se demostraba la presencia de la molécula en los eritrocitos nucleados de las aves y las serpientes, y otro del propio Hoppe-Seyler, que confirmaba los hallazgos de Miescher.

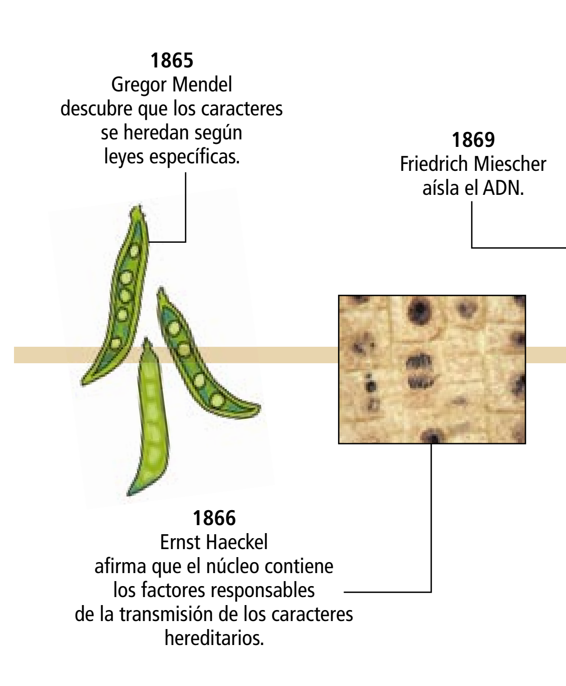
Regreso a Basilea

Tras su estancia en Leipzig, le ofrecieron a Miescher entrar en el claustro docente de la Universidad de Basilea. En 1870 volvió a su ciudad natal. Mediante sus logros científicos en el extranjero se había ganado una reputación de investigador tenaz e ingenioso. En 1871 realizó su habilitación. Al año siguiente, a la edad de 28 años, se le ofreció la cátedra de fisiología de la universidad, el mismo cargo que antes habían ocupado su padre y su tío. Miescher trabajó intensamente en su nuevo puesto, a menudo hasta la extenuación. Además de su pasión por la ciencia, le guiaba el empeño por demostrar que había obtenido la cátedra por sus propios méritos y no por sus lazos familiares.

En Basilea, Miescher reanudó su investigación sobre la nucleína, interrumpida durante su estancia en Leipzig. Le animaba el hecho de que Hoppe-Seyler deseaba continuar la investigación sobre ese tema pero aceptó limitar su trabajo, siempre y cuando Miescher redoblara sus esfuerzos. Su objetivo era describir las características de la nucleína con mayor detalle de lo que lo había hecho en Tubinga. Pero sus condiciones de trabajo eran mucho peores; el proyecto avanzaba lentamente.

En carta a un amigo se lamentaba: "Durante los últimos dos años he deseado fervientemente volver al laboratorio del castillo de Tubinga. Lo que aquí tengo no puede considerarse un laboratorio. Más bien se me tolera en un pequeño rincón del laboratorio de química, en donde apenas puedo moverme, rodeado de estudiantes por todos lados; y por encima de todos, el profesor de química, que también realiza aquí su investigación". Y continúa: "Puedes imaginar lo que es sentirse bloqueado por terribles circunstancias externas que me impiden conseguir cosas que nunca estarán tan al alcance de mis dedos..."

Con todo, Miescher no se dio por vencido. Inspirado por el interés de su tío en la biología del desarrollo, volvió a los estudios sobre la nucleína en huevos y células espermáticas. Pronto comprobó que estas últimas, constituidas casi exclusivamente por núcleos, eran la fuente idónea para aislar nucleína en cuantía suficiente. Basilea resultó ser el lugar más adecuado para esos experimentos. Al estar situada en las orillas del Rin, que en esa época presentaba una copiosa migración anual de salmones que remontaban el río en busca de lugares de desove, Basilea contaba con una próspera industria pesquera de salmón. Ello proporcionaba a Miescher gran cantidad de pescado fresco. En otoño de 1871, convirtió el esperma de salmón en su fuente de nucleína y



llevó a cabo investigaciones cada vez de mayor complejidad.

Durante sus experimentos en Tubinga, Miescher utilizó sólo material fresco. Trabajó con prontitud en el aislamiento de la nucleína. Debía manipular el material en frío para impedir la degradación de la molécula. Dado que en aquella época no se disponía de salas de frío, el aislamiento de la nucleína sólo podía llevarse a cabo durante los meses de invierno.

A menudo debía levantarse en mitad de la noche para ir a pescar salmones en el Rin, traerlos al laboratorio y trabajar durante las primeras horas del día con las ventanas de par en par para que entrara el frío glacial del exterior. Pese a tanta penuria, Miescher aisló abundante cantidad de la nucleína más pura que había estado nunca a su disposición. Ello le permitió llevar a cabo los minuciosos análisis cuantitativos que había proyectado acometer en Tubinga. Las nuevas observaciones confirmaban los resultados iniciales y determinaban con fina precisión el contenido en fósforo de la nucleína.

En 1874 publicó sus resultados sobre la presencia de nucleína en el esperma de vertebrados. Por aquellos años los científicos investigaban el modo en que procedían el desarrollo embrionario y la transmisión de los caracteres hereditarios. Miescher tenía la respuesta al alcance de la mano. En su artículo escribió: "Si quiere pensarse en una sustancia como la responsable de cualquier tipo de fecundación, hay que hablar en primer lugar, sin duda alguna, de la nucleína".

Sin embargo, Miescher no creía que una sola molécula fuera responsable de la herencia. No concebía la manera en que la misma sustancia podía dar lugar a una diversidad tan grande como la de los animales cuyo esperma había examinado. En su opinión, la estructura química de la molécula entrañaba ciertas variaciones, pero se trataba de una variabilidad limitada; demasiado escasa como para explicar las diferencias observadas entre individuos de la misma especie y mucho menos entre especies distintas.

Defendió, en cambio, que los estímulos mecánicos ocasionados por el movimiento del esperma y otros procesos (como los que se observan durante la excitación de los nervios y de las fibras musculares) eran los responsables del desarrollo del huevo fecundado.

Pero Miescher abogó también por una hipótesis sobre la transmisión de la información hereditaria, que, si bien errónea en sus detalles, se halla muy próxima a la descripción actual del almacenamiento de información en el ADN. Especuló sobre la posibilidad de que la información pudiera codificarse en la disposición estereoquímica de los átomos de carbono o, dicho de otra forma, la organización de los mismos en el interior de las moléculas. De igual modo que basta un alfabeto de 26 letras para expresar todas las palabras y conceptos de numerosos idiomas, las moléculas estarían compuestas por distintos *estereoisómeros* (formas geométricas específicas de sus átomos constituyentes).

Un número elevado de átomos de carbono asimétricos en macromoléculas orgánicas, así las proteínas, resultaría en una cantidad de

El autor

Ralf Dahm trabaja en el Centro de Investigación del Cerebro, en la Universidad de Medicina de Viena. Centra sus estudios en las bases genéticas del desarrollo y las enfermedades oculares y cerebrales.

7. EL SIGLO QUE CONDUJO a la investigación de Watson y Crick vio numerosos descubrimientos científicos que ahondaron en la estructura y función del ADN. En esta cronología se muestran algunos de los acontecimientos clave. Después de Watson y Crick, las investigaciones continuaron la secuenciación del genoma de numerosos organismos, incluido el del ser humano en 2001.

1884–85
Oscar Hertwig, Albrecht von Kölliker, Eduard Strasburger y August Weismann demuestran que el núcleo de la célula contiene las bases de la herencia.

1928
Frederick Griffith propone un "principio de transformación" que subyace bajo la transmisión de las propiedades de un tipo de bacteria a otra.

1929
Phoebus Levene identifica los elementos constitutivos del ADN.

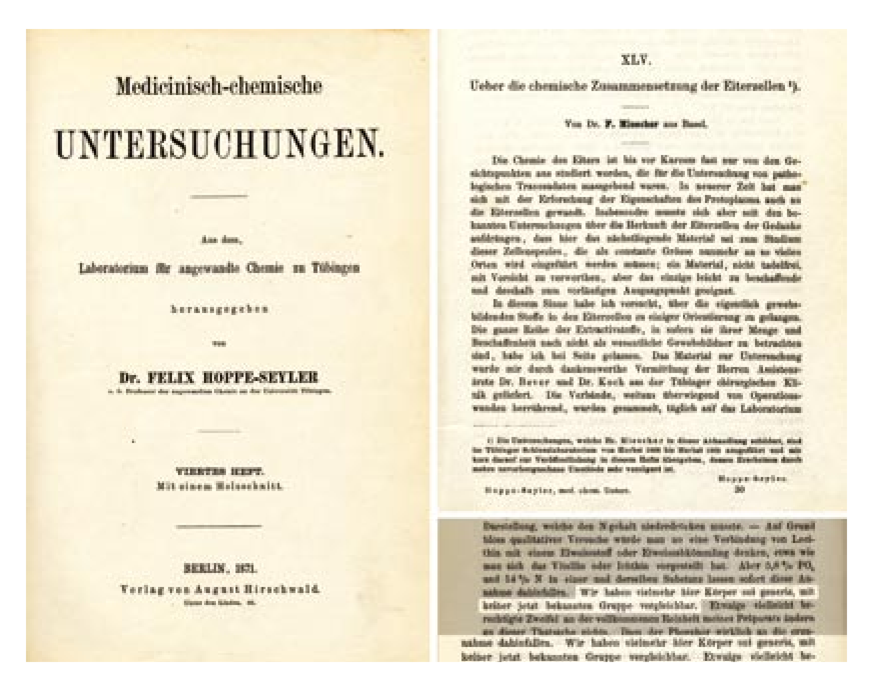
1944
Oswald T. Avery, Colin MacLeod y Maclyn McCarty demuestran que el "principio de transformación" de Griffith corresponde al ADN.

1949-50
Erwin Chargaff encuentra que la composición de las bases del ADN varía de una especie a otra, pero las bases están presentes siempre en proporciones fijas en cada especie.

1952
Alfred Hershey y Martha Chase utilizan virus para confirmar que el ADN constituye el material genético.

1953
Rosalind Franklin y Maurice Wilkins utilizan rayos X para demostrar que el ADN presenta una estructura helicoidal que se repite de forma regular.

1953
James Watson y Francis Crick descubren la estructura molecular del ADN (una doble hélice).


Medicinisch-chemische

UNTERSUCHUNGEN.

Laboratorium für angewandte Chemie zu Tübingen

herausgegeben

von

Dr. FELIX HOPPE-SEYLER

VIERTES HEFT.

Mit einem Holzschnitt.

BERLIN, 1871.

Verlag von August Hirschwald.

XLV.

Ueber die chemische Zusammensetzung der Eiterzellen[1].

Von Dr. F. Miescher aus Basel.

8. EL CRUCIAL DESCUBRIMIENTO DEL ADN queda oscurecido por el título del primer trabajo de Miescher: "Sobre la composición química de las células del pus" (*arriba a la derecha*). Este artículo apareció en 1871 en la revista dirigida por Hoppe-Seyler *Medicinisch-chemische Untersuchungen* (*izquierda*). Miescher subrayaba la novedad del hallazgo: "Nos encontramos aquí con entidades que tienen su propia naturaleza, no equiparables a ningún grupo conocido" (*texto resaltado*).

estereoisómeros extraordinariamente grande. Por ejemplo, una molécula que contara sólo 40 con átomos de carbono asimétricos podría contener 2^{40} o más de un billón de estereoisómeros. Miescher pensaba que esa cifra sería suficiente para codificar la información hereditaria de todas las formas de vida. Más adelante, propuso que sería posible prevenir la aparición de errores moleculares durante el desarrollo del embrión, mediante la fusión de la información de dos células germinales durante la fecundación. Esas opiniones parecen anticiparse a lo que hoy se considera un saber común: que los alelos intactos de un progenitor compensan los defectos en el alelo heredado del otro progenitor.

Ampliar horizontes

Poco a poco Miescher fue dedicándose a otros temas y no volvió a publicar sobre la nucleína. A mediados de los años setenta del siglo XIX, estudió los cambios que se producían en la anatomía del salmón durante las migraciones anuales del océano a las frías aguas del Rin en donde desovaba, un viaje durante el cual el pez ayunaba.

Miescher pasó inviernos enteros levantándose en medio de la noche para dedicar las primeras horas del día a capturar salmones en las orillas del río. Cargó miles de ellos hasta el laboratorio, los midió y pesó, examinó los músculos, los órganos internos y la sangre. Le asombraba el hecho de que los órganos sexuales del pez experimentaran un gran crecimiento hasta alcanzar, a expensas de los músculos, la cuarta parte del peso total.

En razón de sus trabajos sobre el metabolismo del salmón, el gobierno suizo le encargó en otoño de 1876 un informe sobre la dieta de los reclusos de la cárcel de Basilea. A Miescher no le entusiasmaba el compromiso, que le llevó meses, pero las autoridades quedaron favorablemente impresionadas por los resultados. Recibió encargos similares de otras prisiones. Parecía que cada cárcel quería tener su propio menú. Y no terminó ahí: instituciones educativas, asociaciones dedicadas a la alimentación y otros organismos relacionados con la nutrición solicitaron el consejo de Miescher. Terminó por hartarse de ese trabajo. Indagaciones sobre la dieta de los suizos, libros de cocina para los trabajadores, tablas de nutrientes para la exposición nacional, controversias con la Compañía de Leche Chamer... Miescher tenía la sensación de estar convirtiéndose en el guardián del estómago de tres millones de suizos.

Unos años después, Miescher se enfrentó a un nuevo reto. En 1885 fundó el primer instituto anatomo-fisiológico de Basilea. Dirigió el centro con responsabilidad. Se propuso fomentar la actividad científica. Contrató técnicos de reconocido prestigio que diseñaban y desarrollaban máquinas e instrumentos para realizar mediciones fisiológicas de suma precisión. Investigó la variación de la composición de la sangre con la altura; descubrió que era la concentración de anhídrido carbónico y no de oxígeno la que regulaba la respiración.

Con el tiempo, el aumento de sus compromisos le llevó al agotamiento. La obsesión por su trabajo y su perfeccionismo le hacían reducir las horas de descanso. Dormía cada vez menos, no dejaba de atender sus lazos sociales y trabajaba incluso en vacaciones. Exhausto, su organismo se debilitaba día a día. A principios de 1890 contrajo la tuberculosis. Hubo de abandonar su trabajo y retirarse a un sanatorio en Davos, en los Alpes suizos.

Por última vez intentó retomar su trabajo, incluida la investigación sobre la nucleína. Pero le fallaron las fuerzas. Murió en 1895, a los 51 años de edad. Tras su muerte, su tío Wilhelm His publicó una recopilación de sus investigaciones. En la introducción escribió: "El reconocimiento de Miescher y de su trabajo no disminuirá con el tiempo, sino que aumentará; sus hallazgos e hipótesis son semillas que darán fruto en el futuro". Ni el propio His podía imaginar cuánta verdad encerraban esas palabras.

El ADN después de Miescher

¿Por qué hoy no se asocia el nombre de Miescher al ADN? Por una parte, a diferencia de numerosas enfermedades, especies o estructuras anatómicas, las moléculas no se denominan según el nombre de su descubridor. Por otra, Miescher no era un buen propagandista de

su trabajo. De talante introvertido, se desenvolvía en un círculo muy restringido. Tenía pocos estudiantes y muchos de ellos le dejaban por su carácter reservado. Además, a pesar de su pasión por la investigación científica, era inseguro y perfeccionista, lo que le llevaba a repetir experimentos y retrasar las publicaciones. El propio Miescher se dio cuenta de que la investigación sobre la nucleína iba cada vez más unida a otros investigadores. En 1889, Richard Altmann cambió el nombre de la molécula por el de "ácido nucleico". Miescher, que siempre había subrayado el carácter ácido de la nucleína, se sintió molesto. Quizá lo que resultó más crítico para el olvido de la contribución de Miescher fueron los 75 años que separaron su descubrimiento del ADN de la posterior verificación de su importancia. Un período demasiado largo.

Medio siglo después del fallecimiento de Miescher, la mayoría de los científicos creía que el ADN, formado por sólo cuatro tipos de componentes básicos, era una molécula demasiado sencilla para codificar la diversidad biológica. Las proteínas, de estructura y composición más complejas, se consideraban las mejores candidatas para almacenar y transmitir la información hereditaria. El interés por el ADN aumentó de nuevo hacia 1940, cuando Oswald T. Avery y sus colaboradores Colin MacLeod y Maclyn McCarty comprobaron que el ADN era, en efecto, la molécula que transportaba la información genética.

En 1952, Alfred Hershey y Martha Chase confirmaron que el ADN correspondía al material genético; un año después, a partir de los análisis con rayos X de Rosalind Franklin y Maurice Wilkins, Francis Crick y James Watson resolvieron su estructura.

En ese momento, las piezas sueltas del rompecabezas encajaron. El ADN no sólo tenía una estructura, sino que esa estructura explicaba su funcionamiento, la duplicación previa a cada división celular y el modo en que se leía la información que contenía para la síntesis de proteínas. A mediados de los años sesenta del siglo pasado, casi un siglo después de las investigaciones de Miescher, se descifró el código genético. Por fin podía leerse el lenguaje en que se escribe la información genética. Esos avances sentaron las bases de una nueva rama de la investigación biológica: la genética molecular.

Desde entonces, el ADN se ha convertido en algo más que una molécula. Se ha transformado en el icono de las modernas ciencias de la vida. Con todo, casi 150 años después de los primeros experimentos de Miescher, queda mucho por descubrir sobre el ADN.

Bibliografía complementaria

UEBER DIE CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER EITERZELLEN. F. Miescher en *Medicinische-chemische Untersuchungen*, vol. 4, págs. 441-460; 1871.

A CENTURY OF DNA. F. H. Portugal y J. S. Cohen. MIT Press; Cambridge, 1977.

DNA PIONEERS AND THEIR LEGACY. U. Lagerkvist. Yale University Press; New Haven, 1998.

FRIEDRICH MIESCHER, THE MAN WHO DISCOVERED DNA. G. Wolf en *Chemical Heritage*, vol. 21, n.º 10-11, págs. 37-41; 2003.

DISCOVERING DNA: FRIEDRICH MIESCHER AND THE EARLY YEARS OF NUCLEIC ACID RESEARCH. R. Dahm en *Human Genetics*, vol. 122, págs. 565-581; 2008.

Célula Couette-Taylor

Un aparato del que ya habló Isaac Newton en 1687 sigue proporcionando un vasto campo de experimentación en dinámica de fluidos

Marc Boada Ferrer

Tras un fenómeno tan común como la circulación del agua por una cañería, se esconden mecanismos de notable interés científico. De su análisis se ocupa la hidrodinámica, la parte de la física que estudia el comportamiento de los líquidos. En esta colaboración nos proponemos construir un instrumento que nos permitirá estudiar el comportamiento dinámico de los líquidos en un amplio espectro de condiciones.

En la mayoría de los sistemas hidrodinámicos (tubos, embalses, barcos, etcétera) sucede que el fluido, agua por ejemplo, roza contra una pared inmóvil, o viceversa. En la interfase, o capa límite, se experimentan fuerzas de cizalla que desembocan en movimientos de disipación de energía en el interior del líquido. En función de la velocidad relativa entre éste y el vaso que lo contiene, aparecen dos tipos de comportamiento: a bajas velocidades, el flujo suele ser laminar, tranquilo y regular; a velocidades elevadas, en cambio, se torna agitado, turbulento y caótico.



MARC SERRANO

Turbulencias en la célula Couette-Taylor. Las partículas en suspensión deben estar fuertemente iluminadas para mostrar el fenómeno en toda su belleza. El pigmento ayuda a mejorar el contraste, sobre todo cuando es oscuro o con una alta saturación.

En esos fenómenos la velocidad constituye un factor crítico. Pero hay otro no menos importante: la viscosidad dinámica del fluido en movimiento. Se define ésta como la resistencia que ejercen las moléculas de un líquido a desplazarse entre sí; la causa última de este fenómeno corresponde a las interacciones intermoleculares que reducen la movilidad. La ley fundamental del movimiento viscoso, establecida por Isaac Newton en 1687, arroja un índice característico para cada líquido.

Mucho después, alrededor de 1880, Osborne Reynolds midió con precisión la velocidad a la que se producían transiciones en el tipo de régimen de circulación, de laminar a turbulento. Descubrió que las transiciones ocurrían cuando cierto parámetro adimensional directamente proporcional al diámetro del tubo (o sección), la densidad y la velocidad del fluido, e inversamente proporcional a la viscosidad de este último, alcanzaba un valor umbral.

Con independencia del equipo instrumental, cuando el parámetro, ahora denominado número de Reynolds (NR), es inferior a 2100, tenemos un movimiento laminar. Cuando supera dicho valor, se convierte en desordenado y turbulento. El NR permite pronosticar el comportamiento de fluidos muy distintos en situaciones dispares. Ello resulta de gran utilidad para el diseño de aeronaves, submarinos o el aparato que ilustramos en esta sección.

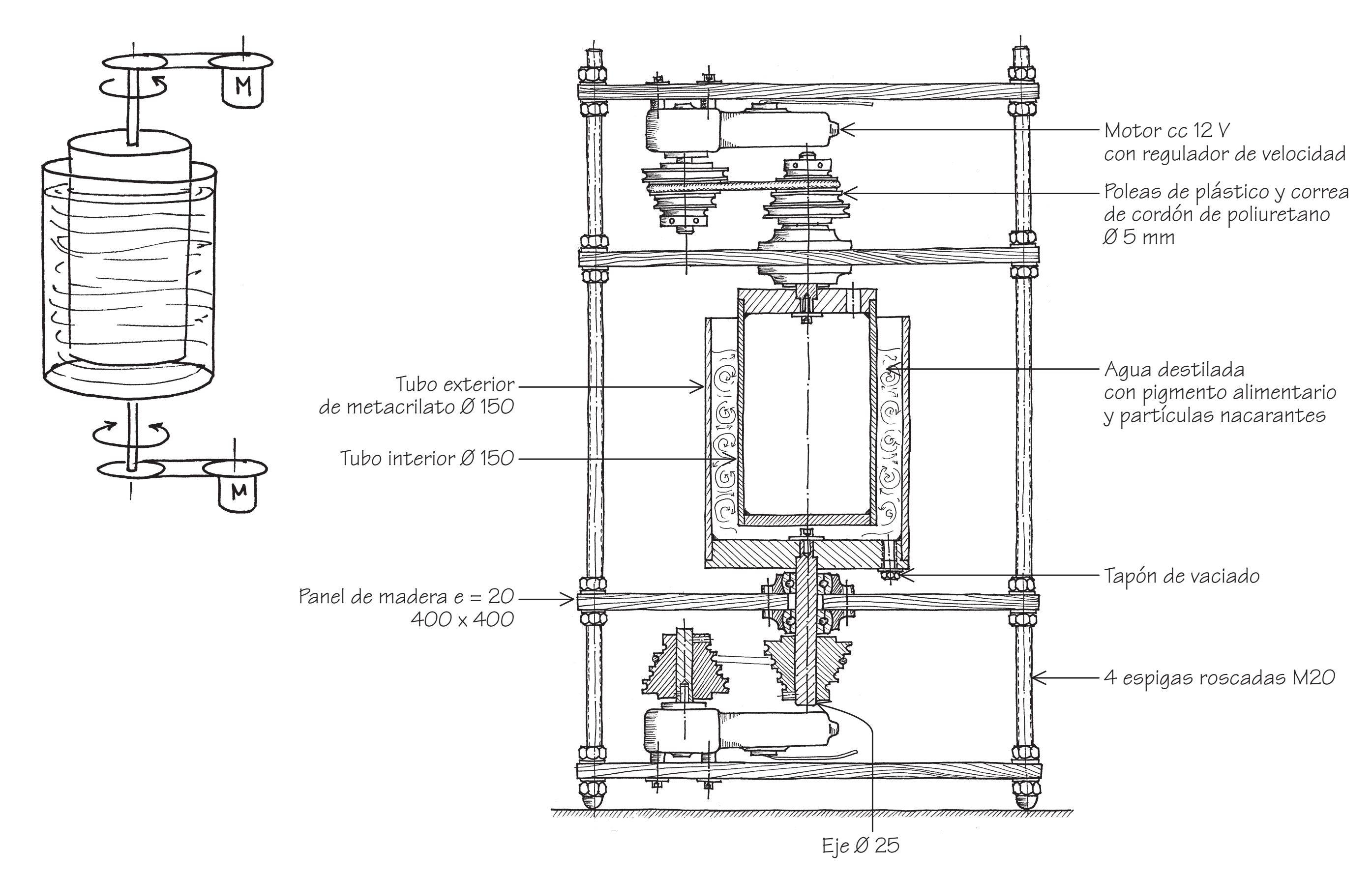
Volvamos a la viscosidad. En la actualidad, numerosos laboratorios disponen de instrumentos que permiten medir con precisión esta magnitud. Para la ciencia decimonónica, en cambio, el asunto distaba mucho de estar resuelto. En la búsqueda de un aparato adecuado, Sir George Gabriel Stokes explicaba en 1848: “Un cilindro hueco y otro macizo pueden montarse de tal manera, que sea posible hacerlos girar con distintas velocidades uniformes en torno a su eje común, en posición vertical. Si se quiere que ambos cilindros giren, lo habrán de hacer en sentido opuesto; si gira sólo uno de ellos, habrá de ser el exterior”. He aquí una buena descripción del dispositivo que nos proponemos construir.

El instrumento recibe su nombre actual de Maurice Couette, quien lo utilizó en 1888 para estudiar los flujos laminares, y Geoffrey Ingram Taylor, quien, a principios del siglo XX, comprobó que, si se aumentaba la velocidad del cilindro interior, el flujo presentaba un espectro muy amplio de comportamientos. Por todo ello, al instrumento en cuestión se le denomina célula Couette-Taylor (C-T).

Centrándonos ahora en el plano constructivo, diremos que este instrumento es de fácil armado si lo proyectamos para bajas velocidades, es decir, si optamos por un fluido viscoso y espacios angostos para contenerlo. Expliquémonos. La geometría de la cubeta puede ser varia. En las células C-T bajas, achatadas y con un canal de circulación de sección rectangular, las paredes interior y exterior se hallan a una distancia notable; la turbulencia (dentro de regímenes bajos de velocidad) es escasa.

En las células C-T altas y estrechas (como la que aquí ilustramos), en cambio, las paredes se hallan próximas y, por tanto, inducen fortísimas fuerzas de cizalla en el fluido.

Dentro de la cubeta existen dos interfases: la superior, donde el líquido se halla en contacto con el aire, y la inferior, donde el líquido toca con la base en rotación de la cubeta. Estas perturbaciones “de extremo” se minimizan mediante la prolongación, en sentido vertical, de la cubeta.



El experimentador puede optar sólo por unas pocas dimensiones estándar para los tubos exteriores, necesariamente transparentes, con los que construirá el artefacto. Dado que la construcción se inicia con numerosas incertidumbres sobre dimensiones y velocidades, opté por la fabricación de un prototipo básico, provisional, con el que debía averiguar bajo qué parámetros se producían los fenómenos que me proponía estudiar.

Para empezar, tomemos un tubo de metacrilato, de unos 200 milímetros de diámetro exterior, unos 300 mm de longitud y un espesor de pared de 5 mm o más. Pediremos a un tornero que mecanice un tapón de plástico con un eje de acero calibrado de 25 mm bien fijado y, sobre todo, perfectamente concéntrico. Pegaremos luego el tapón con epóxido. Repetiremos el proceso con un tubo o una barra de unos 150 mm de diámetro por 300 mm de longitud, que, sumergida en el fluido, no debe ser necesariamente transparente.

Montaremos el eje sobre dos rodamientos de bolas con soporte, que habremos adquirido en un suministro industrial. A su vez, los cojinetes quedarán fijados dos a dos en sólidos paneles de madera hidrófuga. Pondremos un tubo dentro del otro y fijaremos los paneles mediante cuatro espigas enroscadas y de buen diámetro. Realizaremos los ajustes necesarios para lograr una concentricidad total de los dos tubos.

Debemos procurarnos ahora los motores que activarán los cilindros. Al ignorar cuáles serían las velocidades óptimas para los líquidos que me interesaban, opté por dos motores gemelos de corriente continua, pues permiten invertir el sentido de giro mediante un simple conmutador. Para conseguir un amplio abanico de regímenes de experimentación, instalaremos poleas de transmisión entre los ejes de motores y cilindros. Por fin, colocaremos dos paneles más de madera para conformar un conjunto rígido y nivelarlo perfectamente. Será entonces el momento de llenar los tubos.

Para observar los diversos flujos que aparecen en el líquido, hay que incorporar una sustancia "trazadora". En general utilizaremos partículas reflectantes en suspensión. Empezaremos los experimentos con una mezcla de agua destilada, pigmento azul alimentario y un agente nacarante (el trazador) compuesto por diminutas plaquitas de un compuesto orgánico birrefringente. Cada una mide unas pocas micras de superficie y menos todavía de espesor. Su baja densidad aparente permite estabilizarlas en agua, de forma que no se decanten. Es así como las encontramos en el supermercado: en forma de viscosos geles de baño de reflejos nacarados. Las adquiriremos en forma de "perlado concentrado" en industrias suministradoras de productos para jabones.

Se trata de un producto de inestimable valor para el experimentador, pues permite representar, de manera espectacular, las líneas de corriente. Su uso se extiende a la observación de células convectivas, análisis hidrodinámico de perfiles y visualización de flujos en cañerías. Tal fenómeno se debe a las plaquitas, que se orientan según el flujo, reflejando más o menos luz hacia el observador. Sea cual fuere su procedencia, de concentrado o champú, en agua destilada el perlado decanta con lentitud. Incorporaremos, pues, entre un 5 y un 10 por ciento de glicerina. Con todo ello, habremos elevado de forma notable la densidad y la viscosidad del fluido. Pueden ensayarse otras partículas (polvo de aluminio, por ejemplo). Existe una interesantísima bibliografía sobre la visualización de flujos bajo los medios más diversos.

La experimentación con la célula C-T requiere un control y una regulación pre-

ESPIRALES LIQUIDAS

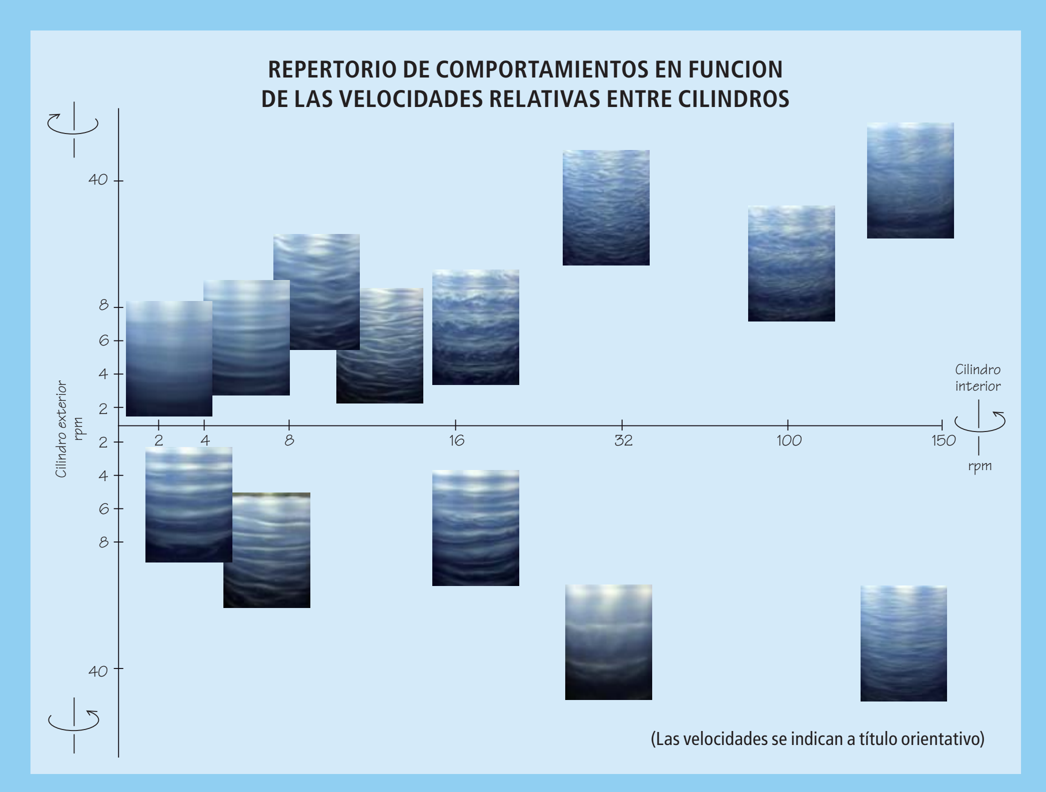
La comprensión del amplio abanico de comportamientos que se observan en la célula Couette-Taylor requiere de un vasto arsenal matemático para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones permiten pronosticar —no sin dificultades— el comportamiento dinámico de los fluidos, en particular, cuando éstos son incompresibles y newtonianos (de viscosidad constante). El análisis teórico se simplifica de forma notable, si se considera que la longitud de los cilindros es mucho mayor que el espacio entre ellos.

Cuando los dos cilindros giran en el mismo sentido con velocidades semejantes (con independencia de cuál es el más rápido), la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes es sencilla, ya que guarda un alto grado de simetría.

Por el contrario, cuando los cilindros giran en sentidos opuestos, las soluciones entrañan mayor complejidad. Los patrones de flujo observables corresponden a distintas rupturas de simetría que conducen a nuevas soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes de simetría menor. Al variar la velocidad relativa entre los cilindros (parámetro externo de control), aparecen puntos críticos en las soluciones de la ecuación general que dan lugar a bifurcaciones, las cuales representan nuevos estados de flujo del sistema. Esas bifurcaciones, llamadas de Hopf, pueden ser inestables y conducir a oscilaciones periódicas entre estados distintos. En determinadas condiciones se observa también la interacción de modos distintos de circulación, así como una transición hacia la turbulencia cuando el parámetro de control alcanza valores suficientemente elevados.

Hay que tener en cuenta que la introducción de partículas trazadoras altera las propiedades del líquido, en particular cuando son poliméricas, ya que el fluido adquiere viscoelasticidad. Es decir, el comportamiento del fluido respecto a los esfuerzos no es sólo viscoso, sino que aparece también una respuesta elástica. La turbulencia surge entonces en otros regímenes.

El estudio de estas espirales líquidas encuentra diversas aplicaciones de interés práctico: en viscosimetría, enfriamiento de maquinaria eléctrica rotante, desalinización, etcétera.



cisa de las velocidades de rotación. Exige además una medición exacta de éstas. Por tanto, en dispositivos más perfeccionados, lo correcto es instalar motores paso a paso. A éstos sumaremos los tacómetros necesarios ("encoders"), que nos permitirán adquirir de forma sistemática registros y patrones de comportamiento. Dado que mi objetivo era comprobar la viabilidad del sistema y su grado de dificultad, tomé los datos mediante un tacómetro fotoeléctrico, lo que hizo muy engorrosa la operación.

En cualquier caso, con los cilindros llenos hasta 5 o 6 centímetros de la boca, alimentaremos los motores y observaremos lo que ocurre. Al empezar a girar, el líquido, antes de aspecto uniforme, empieza a mudar su aspecto. Primero asoman vórtices espirales en su seno. Cambia luego súbitamente y se torna más ordenado. Se observa, por fin, un enorme repertorio de comportamientos que varían en función de la velocidad de giro (que gobernaremos mediante el potenciómetro de velocidad): aparecen y desaparecen estados de orden y turbulencia, así como transiciones suaves mezcladas con frecuentes rupturas de simetría.

Los movimientos relativos de un cilindro respecto del otro pueden englobarse en dos tipos principales. En el primero, los dos cilindros rotan en el mismo sentido, aunque a velocidades distintas; en estos regímenes, las velocidades angulares relativas entre cilindros son reducidas y los patrones muestran una circulación laminar similar al rodillo con patrón helicoidal de la fachada de la barbería.

En el segundo, los cilindros giran en sentido opuesto. La turbulencia aparece pronta y fascinante. Con agua poco viscosa (un dos por ciento de concentrado nacarante) y pigmento para pinturas azul y negro, girando a menos de 20 revoluciones por minuto y ensayando todas las combinaciones de velocidad entre cilindros, podremos observar un mínimo de cinco patrones de circulación: flujo laminar de Couette, vórtices ondulantes, microturbulencia, espirales de barbería y vórtices aislados.

MARC SERRANO (*fotografías*)

Los Objetivos de Desarrollo del Milenio a la mitad de camino

Todavía es posible una transformación de Africa para 2015 si las naciones ricas efectúan las inversiones que habían prometido

Jeffrey D. Sachs

Los dirigentes mundiales, reunidos en la sede de Naciones Unidas en septiembre de 2000, adoptaron los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), por los que se comprometían a luchar contra la extrema pobreza, la hambruna y las enfermedades hasta 2015. En el ecuador de la fecha señalada tenemos ejemplos alentadores de espectaculares avances, como la reducción del 91 por ciento de las muertes por sarampión en Africa y otros progresos contra la malaria. En conjunto, lo conseguido sigue siendo demasiado poco; aun así, todavía se podría cumplir el plazo de los ODM con inversiones específicas y aceleradas en los países pobres.

Para acabar con la extrema pobreza, el hambre y las enfermedades no son suficientes las fórmulas tradicionales del crecimiento económico: imperio de la ley, seguridad, control de la corrupción y libre comercio. Hacen falta inversiones públicas en agricultura, sanidad, educación e infraestructuras; se necesitan para sentar las bases de una actividad productiva del sector privado. Por ejemplo, la inversión pública en carreteras, electricidad e instalaciones portuarias aumentaría eficazmente la rentabilidad de las exportaciones agrícolas en el Africa subsahariana. Esta inversión es un complemento y una condición previa para la inversión rentable del sector privado, no la sustituye.

El Grupo Director de los ODM para Africa, encabezado por el secretario general de la ONU Ban Ki-moon, dirigió recientemente una revisión crítica e identificó varias inversiones públicas específicas y de alta prioridad que se pueden asumir a partir de ahora y hasta 2015. Para cada área de inversión hay estrategias prácticas de ejecución inmediata (formas de controlar la malaria y la tuberculosis, o la recuperación de los nutrientes del suelo para los campesinos). Existen muchos y poderosos ensayos de proyectos que se podrían desarrollar rápidamente. Es el caso del programa Aldeas del Milenio, que demuestra los beneficios de las inversiones de los ODM en localidades rurales. Lo que está haciendo falta no es ni técnica, ni voluntad, ni planes, ni métodos de ejecución, ni siquiera un modo de controlar la corrupción en el reparto de la ayuda, sino la necesaria aportación financiera de los países donantes.

El principal problema, por supuesto, es que los países pobres no pueden asumir esa inversión pública por sí solos. El informe del secretario general establece que la financiación necesaria de los donantes para poder concluir el trabajo es de 72.000 millones de dólares adicionales al año. Es una suma ciertamente considerable, pero del todo compatibles con las cantidades que los países donantes habían prometido destinar a Africa.

Las cuentas son sencillas: la suma actual de los ingresos de los países donantes (Europa, EE.UU., Canadá y Japón) es de 37 billones de dólares anuales; los 72.000 millones requeridos sólo suponen aproximadamente el 0,2 por ciento de su producto interior bruto. Estos países llevan tiempo prometiendo incrementar su ayuda al 0,7 por ciento del PIB; si lo que aportan actualmente es el 0,28 por ciento (104.000 millones), el 0,2 por ciento que hace falta entra dentro de lo que se había prometido como ayuda para alcanzar los ODM.

A pesar de la gran promesa de los países del G8 de duplicar la ayuda a Africa entre 2004 y 2010, la aportación de las naciones donantes casi no ha aumentado. EE.UU. es el que menor porcentaje del PNB tiene dedicado a la ayuda internacional, el 0,16 por ciento de su PNB en 2007. ¡Sólo destinó a Africa un 0,04 por ciento de su PNB!

El factor que impide actualmente alcanzar los ODM en Africa es que los países donantes no hacen honor a sus compromisos. La ayuda de EE.UU. debería aumentar al 0,5 por ciento del PNB en 2012 y después al 0,7 por ciento en 2015. Esta cantidad equivaldría sólo a una pequeña parte del presupuesto militar de EE.UU. (aproximadamente el 4,5 por ciento del PNB) y serviría para prevenir operaciones militares, bastante más costosas y mucho menos efectivas, en regiones pobres e inestables.

El próximo presidente debería anunciar al mundo que EE.UU. apoya activamente los ODM mencionándolos en su discurso de investidura del próximo mes de enero. Imbuiría al mundo de buena voluntad. Inspiraría la misma confianza y esperanza que en 1961 el recién elegido presidente John F. Kennedy, con su memorable compromiso de que EE.UU., "durante el tiempo que fuese necesario", ayudaría a los pobres del mundo a romper las cadenas de la miseria general.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia (www.earth.columbia.edu).

MATT COLLINS

¿Qué es el teorema de Frege?

Cómo se deduce toda la aritmética a partir de un solo principio

Gabriel Uzquiano

Entre los principios fundamentales de la aritmética, también conocidos como axiomas de Peano, se encuentran los siguientes:

(1) 0 es un número natural.
(2) Todo sucesor de un número natural es un número natural.
(3) 0 no sucede a ningún número natural.
(4) Todo número natural tiene exactamente un sucesor.
(5) Si 0 posee cierta propiedad *P* y todo sucesor de un número con propiedad *P* también posee *P*, entonces todo número natural posee la propiedad *P*.

De estos cinco principios, junto a definiciones de la adición y la multiplicación, se siguen todos los teoremas de la aritmética básica. Pero ahora sabemos que es posible deducir todo esto, y más, a partir de un solo principio con cierta apariencia de trivialidad.

Empecemos con la observación de que, para hacer comparaciones de cardinalidad, no siempre hay que contar. Sabemos que en la clausura de los últimos juegos olímpicos había exactamente tantos abanderados como países participantes. Al fin y al cabo, sabemos que había exactamente un abanderado por país y un país por abanderado, de modo que los abanderados se encuentran en correspondencia uno a uno con los países participantes. Se sigue que el número de abanderados coincide con el número de países participantes, aunque no sepamos cuál. Alternativamente, podríamos haber contado 203 abanderados para después comparar esta cifra con el número de países participantes, que, claro, resultaría ser el mismo. Si abreviamos abanderado como *F* y país participante como *G*, nos encontramos ante un caso particular de la siguiente generalización:

Dados cualesquiera *F*, *G*, el número asociado a *F* = el número asociado a *G* si y sólo si *F* se encuentra en correspondencia uno a uno con *G*.

¿Parece trivial? Pues bien, de este principio, junto con definiciones apropiadas de "0", "sucede" y "número natural", se siguen todos los principios que hemos listado, así como el resto de la aritmética básica, en cuanto incluimos definiciones apropiadas de adición y multiplicación.

Este resultado, al que ahora se da el nombre de teorema de Frege, permaneció sepultado en los escritos de Gottlob Frege (1848-1925) durante aproximadamente un siglo, que es el período que transcurrió hasta que lo desenterraron varios autores de manera independiente.

Frege dedicó su vida profesional a un propósito: mostrar que los principios de la aritmética no son más que teoremas lógicos. A diferencia de Immanuel Kant, Frege pensaba que no es preciso recurrir a nuestra intuición para mostrar que 5 + 7 = = 12 o que todo número natural tiene un sucesor. Toda verdad aritmética es en realidad un teorema lógico deducible de axiomas lógicos por medio de definiciones.

Con esa intención desarrolló un lenguaje formal, acompañado de un sistema deductivo con el que poder llevar a cabo su investigación. El resultado apareció en 1879 bajo el título *Begriffsschrift*, o "Conceptografía", y es, sin lugar a dudas, un momento clave en el desarrollo de la lógica moderna. A esta obra siguió en 1884 un esbozo de la derivación formal de los principios fundamentales de la aritmética a partir de axiomas lógicos: *Grundlagen der Arithmetik*. Frege vio esa obra como un anticipo de lo que había de realizar en su obra fundamental, *Grundgesetze der Arithmetik*, cuyo primer volumen no vería la luz hasta 1892. Para entonces, Frege creía haber llevado a cabo su proyecto.

La clave para poder argumentar que los principios fundamentales de la aritmética son teoremas lógicos consistía en dar definiciones adecuadas de los términos "número", "0", "sucesor", y "número natural". Su primer paso en esa dirección consistió en entender los enunciados del estilo de "Júpiter posee cuatro lunas mayores" como aseveraciones acerca de un concepto: *luna mayor de Júpiter*, en ese caso concreto. Un concepto, para Frege, es parecido a lo que un lógico medieval hubiera llamado un *universal,* ya que se trata de algo compartido por varios objetos. Por ejemplo, el concepto *luna mayor de Júpiter* es algo compartido por Ganímedes, Calisto, Io y Europa, que serían los objetos que responden a ese concepto. De manera similar, el concepto *planeta* tendría a todo planeta como objeto que le responde, y el concepto *no idéntico a sí mismo* no tendría ningún objeto que le respondiese.



¿Qué es el número del concepto *luna mayor de Júpiter*? La respuesta de Frege es un caso particular de la siguiente definición:

— El número de un concepto *F* es la extensión del concepto *concepto en correspondencia uno a uno con el concepto F*.

Podemos pensar la extensión de un concepto como el conjunto de los objetos

¿Quiere saber más?

Grundlagen fue traducido al castellano por Ulises Moulines, como *Fundamentos de la Aritmética*. Editorial Laia, 1972. Se puede descargar el texto original en www.ac-nancy-metz.fr/enseign/philo/textesph/Frege.pdf

Para una introducción a la obra de Frege, recomiendo "Gottlob Frege and the Foundations of Arithmetic", de George Boolos, en su colección *Logic, Logic, and Logic*, Harvard University Press, págs. 143-154.

Para ver un esbozo de la prueba, recomiendo "An Introduction to Frege's Theorem", de Richard G. Heck, en *Harvard Review of Philosophy*, vol. 7 (1999), págs. 56-73. Puede descargarlo en www.hcs.harvard.edu/~hrp/issues/1999/Heck.pdf



que responden a ese concepto. Así, la extensión de *luna mayor de Júpiter* sería el conjunto de Ganímedes, Calisto, Io y Europa, y la extensión de *no idéntico a sí mismo* sería el conjunto vacío.

El número del concepto *luna mayor de Júpiter* es entonces el conjunto de conceptos en correspondencia uno a uno con el concepto *luna mayor de Júpiter*. ¿Qué quiere decir que dos conceptos se encuentran en correspondencia uno a uno? El concepto *luna mayor de Júpiter* se encuentra en correspondencia uno a uno con el concepto *miembro de los Beatles* porque existe una relación *Rel*, que tiene por extensión un conjunto de pares de objetos con las siguientes propiedades: (i) todo objeto que responde al primer concepto figura como primer miembro de uno de los pares de *Rel*, (ii) todo objeto del segundo concepto figura como segundo miembro de uno de los pares de *Rel* y (iii) *Rel* es uno a uno: ningún objeto figura como primer miembro en más de un par de objetos de *Rel* o como segundo miembro en más de un par de objetos de *Rel*. *Rel* podría constar, por ejemplo, de los pares <Ganímedes, John>, <Calisto, Paul>, <Io, George> y <Europa, Ringo>. En general, el número del concepto *luna mayor de Júpiter* es el conjunto cuyos miembros son el concepto *miembro de los Beatles*, el concepto *punto cardinal*, etc.

El siguiente paso consiste en definir "0", "sucede" y "número natural":

— 0 es el número del concepto *no idéntico a sí mismo*.
— *n* sucede a *m* si y sólo si *n* es el número de un concepto *F* y, para algún objeto *x* que responde a *F*, *m* es el número del concepto *es un objeto que responde a F pero no es idéntico a x*.
— *n* es un número natural si y sólo si *n* es 0 o puede obtenerse a partir de 0 tras un número finito de aplicaciones de la operación de sucesor.

El número 0 es el número del concepto *no idéntico a sí mismo,* que es sólo el conjunto cuyos miembros son conceptos a los que no responde ningún objeto, como por ejemplo *unicornio*, *mayor número primo*, etc. El número 1 es el conjunto de conceptos a los que responde exactamente un objeto, como *presidente del gobierno*, *luna terrestre*, etc. El número 2 es el conjunto de conceptos a los que responden exactamente dos objetos, etc.

Finalmente, en *Grundgesetze*, Frege utilizó su axioma V para extraer consecuencias de estas definiciones:

Dados dos conceptos *F*, *G*, la extensión de *F* = la extensión de *G* si y sólo si todo objeto que responde a *F* responde a *G* y viceversa.

¿Parece razonable? Lo único que requiere este axioma es que, aun cuando asignemos una extensión a cada concepto, no asignemos la misma extensión a dos conceptos bajo los cuales caen diferentes objetos.

Desafortunadamente, a mediados de 1902, trabajando ya en el segundo volumen de *Grundgesetze*, Frege recibió una carta de Bertrand Russell en la cual éste le comunicaba que era posible derivar una contradicción a partir del axioma V. Para ello bastaba considerar el concepto *extensión de un concepto al que ella misma no responde*. Llamaremos *R* a ese concepto. Sea *r* la extensión de *R*. Quizá convenga ser más explícitos*:* la extensión de *R* es el conjunto de todas aquellas extensiones de concepto que no responden al concepto del que son extensión y, por lo tanto, no pertenecen a sí mismas. Por ejemplo, la extensión de *luna mayor de Júpiter* no es una luna mayor de Júpiter, ya que el conjunto de las lunas mayores de Júpiter no es una luna mayor de Júpiter. En cambio, la extensión de *no es una luna mayor de Júpiter* no es una luna mayor de Júpiter; por lo tanto, pertenece a la extensión de *no es una luna mayor de Júpiter:* pertenece a sí misma.

Con ayuda del axioma *V*, es posible probar que *r* responde a *R* si y sólo si *r* no responde a *R*. De existir, *r* sería el conjunto de todos los conjuntos que no se pertenecen a sí mismos. Pero si *r* se perteneciera a sí mismo, entonces ya no sería uno de ellos y por tanto no podría pertenecer a *r*. Si, por el contrario, *r* no perteneciera a sí mismo, entonces sería uno de ellos y por tanto debería pertenecer a *r*. En resumen: *r* pertenece a *r* si y sólo si *r* no pertenece a *r*.

Esta derivación, más conocida con el nombre de "paradoja de Russell", tuvo un efecto devastador para Frege, ya que, sin el axioma, ni siquiera podía deducir que 0 es diferente de 1 o de cualquier otro número. En la siguiente edición de *Grundgesetze*, Frege intentó rectificar la situación reemplazando el axioma V por un axioma mucho más débil. Lamentablemente, aunque consistente en sí, este nuevo axioma era inconsistente con la existencia de dos objetos y, por tanto, inútil para sus propósitos.

Hasta hace apenas dos décadas nuestra historia hubiera concluido aquí. Frege vio cómo toda una vida de trabajo había sido en vano. Sin embargo, en los años ochenta, varios autores descubrieron de manera independiente que era posible acotar el papel del axioma V a la derivación de un principio intermedio, al que se ha dado en llamar principio de Hume:

Dados dos conceptos *F*, *G*, el número de *F* = el número de *G* si y sólo si *F* se encuentra en correspondencia uno a uno con *G*.



Se llama *teorema de Frege* a la siguiente observación:

Todos los principios fundamentales de la aritmética son derivables del principio de Hume como único axioma junto a definiciones de "0", "sucesor" y "número natural" en el seno de la lógica de segundo orden, en la que se admiten variables que varían sobre conceptos, no sólo individuos.

¿Estaba Frege al tanto del teorema de Frege? Aunque nunca se molestó en formularlo, sería inverosímil pensar lo contrario. Lo que ocurre es que nunca pensó que el principio de Hume pudiera ser considerado un axioma lógico y, por tanto, el resultado no se ajustaba a sus propósitos.

Bombas de calor domésticas

Calefacción y refrigeración

Mark Fischetti

La subida de los precios del petróleo, del gas natural y de la electricidad que alimentan los sistemas de calefacción y refrigeración está impulsando la instalación de bombas de calor en las viviendas. Extraen el calor o el frío contenidos en el aire externo o en el suelo; ofrecen un mayor rendimiento y menores gastos a largo plazo.

Hay dos opciones en boga. En los diseños de aire a aire, una máquina instalada fuera de la casa hace uso del aire atmosférico como fuente y sumidero de calor. En los diseños geotérmicos, la transferencia de calor corre a cargo del fluido contenido en unos tubos tendidos por el terreno. En ambos casos, un refrigerante fluye por tuberías desde el exterior hasta una máquina instalada en el interior, y el aire así caldeado o enfriado es impulsado por un ventilador hacia las habitaciones de la casa a través de canalizaciones (*véanse las ilustraciones*). Suelen compararse ambos sistemas a acondicionadores de aire reversible que lanzasen aire frío o caliente, según el caso, por el interior de la vivienda. Cuando cambia la estación, se acciona un conmutador y se invierte el flujo.

Aun cuando ambos sistemas consumen electricidad, los dos ofrecen un rendimiento superior al de los diseños ordinarios, pues en vez de quemar combustible para obtener calor o frío desde cero, uno y otro aprovechan el calor o el frío contenido en el aire exterior o en el suelo. Pero los sistemas de aire a aire consiguen el máximo rendimiento cuando el aire exterior está entre 0 ºC y 1,5 ºC: son más adecuadas para zonas templadas. En climas más rigurosos puede añadirse un pequeño calefactor, pero ello eleva la factura. Los sistemas geotérmicos de tubos tendidos a 2 o 2,5 metros bajo el suelo no tienen esa limitación, pues la temperatura del terreno no desciende por debajo de cero grados a tal profundidad, aunque por lo general son de montaje más caro.

Las bombas de calor están en el mercado desde los años cincuenta, pero en años recientes se han vuelto más competitivas porque motores y compresores son más eficientes y de funcionamiento más barato; condensadores y evaporadores pueden transferir más calor pese a que han disminuido de tamaño.

Las bombas de calor poseen sólo una pequeña fracción del mercado de las calefacciones y acondicionadores de aire domésticos. Aun así, la demanda de ambos tipos se está multiplicando, especialmente cuando se trata de actualizar instalaciones ya existentes.

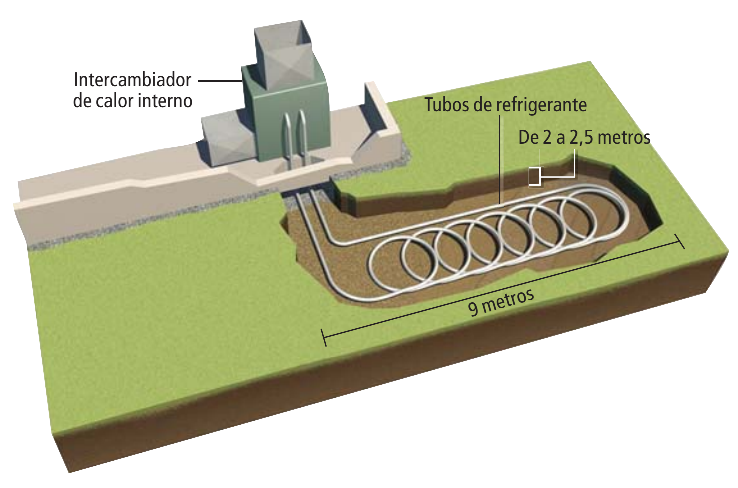
¿SABIA USTED QUE...?

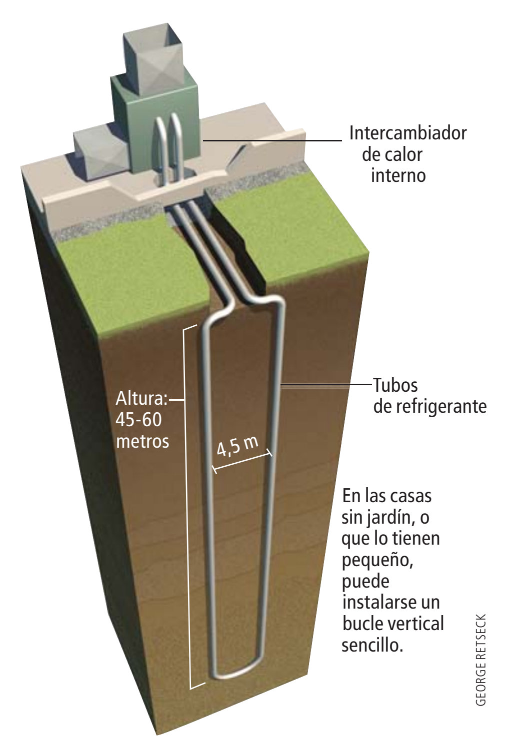
➤ **¿FALTA CARGA?:** Tras un año de servicio, tres de cada cuatro bombas de calor o acondicionadores de aire domésticos podrían perder la carga de refrigerante correcta, con la merma consiguiente de su rendimiento energético hasta en un 15 por ciento.

➤ **FUERA EL CLORO:** Desde los años sesenta, el refrigerante más empleado ha sido un halocarburo, el HCFC-22, o, simplemente, R-22. Pero en EE.UU. y Europa quedará prohibido en los nuevos productos a partir de 2010 ya que desprende cloro, y éste elimina el ozono de la estratosfera. Los fabricantes lo están sustituyendo principalmente por un hidrofluorocarburo: HFC-410A.

➤ **NADA SE DESPERDICIA:** En verano, los intercambiadores de calor descargan una gran cantidad de calor al exterior. Pero ese calor puede enviarse por una tubería suplementaria a un calentador de agua interior y obtener así agua caliente doméstica. En invierno, el sistema no genera calor residual en cantidad suficiente, por lo que es necesario el calentador de agua común.

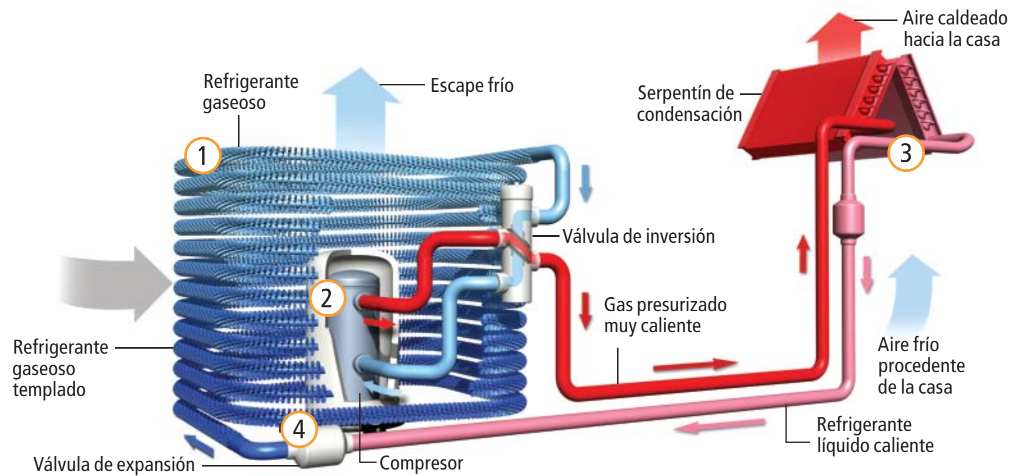
LAS BOMBAS DE CALOR GEOTERMICAS funcionan como los intercambiadores de calor de aire a aire (*página contigua*), aunque en lugar de calentar o enfriar un refrigerante con el aire exterior, envían el refrigerante al suelo, del que captan calor en invierno y al que ceden calor en verano.

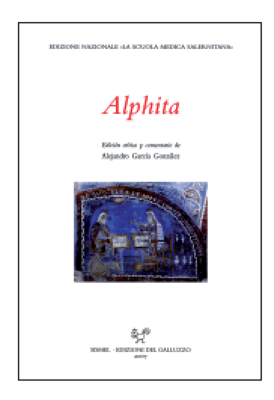




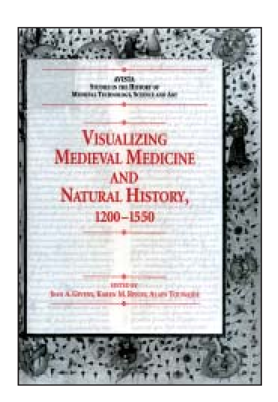
REFRIGERACION EN VERANO. En las bombas de aire a aire, un refrigerante gaseoso templado (*1*) procedente del interior de la casa atraviesa un compresor (*2*), que lo calienta por compresión. Una corriente forzada de aire exterior le roba calor al gas y éste se licua (*3*). El líquido formado retorna a la casa a través de una válvula de expansión que lo transforma en gas frío (*4*). El aire caliente procedente de la casa es impulsado mediante ventiladores sobre ese gas frío en el interior de un evaporador, donde el aire se enfría y es devuelto a la casa. El gas, otra vez caliente, se dirige al compresor y el ciclo se repite.

CALEFACCION EN INVIERNO. El refrigerante gaseoso templado (*1*) de la unidad exterior atraviesa un compresor (*2*), que lo calienta por compresión y lo envía a la unidad interior. En ésta, el aire interior frío es impulsado sobre el gas, al que roba calor, y luego es enviado a caldear la casa. El gas refrigerante se licua (*3*) y retorna al exterior, donde atraviesa una válvula de expansión que lo transforma en gas frío (*4*). Cuando el refrigerante se expansiona, capta calor del aire exterior y es devuelto al compresor para reiniciar el ciclo.

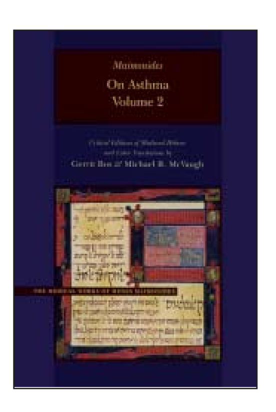




ALPHITA.
Edición crítica y comentario de Alejandro García González. Sismel. Edizioni del Galluzzo; Florencia, 2007.



VISUALIZING MEDIEVAL MEDICINE AND NATURAL HISTORY, 1200-1550.
Dirigido por Jean A. Givens, Karen M. Redes y Alain Touwaide. Ashgate; Aldershot, 2007.



ON ASTHMA, VOLUME 2. EDICIONES CRITICAS DE LAS TRADUCCIONES AL LATIN Y AL HEBREO.
Dirigido por Gerrit Bos y Michael R. McVaugh. Brigham Young University Press, 2008.

Biología medieval

Triple apoyatura de la ciencia medieval: terminología, dibujo y traducción

Entre otros factores auxiliares del desarrollo de la ciencia medieval, hubo tres que revistieron particular importancia: los glosarios, las ilustraciones y la traducción. Los tres se hallan entreverados. El *Alphita*, epítome de los glosarios médicos difundidos en los siglos XII y XIII, emerge de la traducción al latín de la ciencia árabe, actividad que comenzó con Constantino el Africano (1010/20-1087). La eficacia de este tipo de vocabulario especializado se conoció ya en la antigüedad tardía latina, cuando aparecieron los primeros *glosaria*, o en la alta Edad Media, con los *hermeneumata*, o interpretaciones de nombres griegos, sobre todo de plantas, con nombres latinizados.

Alphita debe su nombre a la primera entrada de ese glosario salernitano: *Alphita, farina ordei idem*. Alejandro García nos ofrece una exigente edición crítica que sustituye a las de Salvatore de Renzi, de 1854, y John Lancaster Gough Mowat, de 1887. El *Alphita* consta de 1269 entradas. Los términos remiten a conceptos asociados a la patología y la terapéutica, con particular detenimiento en los remedios del mundo vegetal y mineral. Anónimo y compuesto entre finales del siglo XII y primera mitad de la centuria siguiente, bebe en la *Articella*, una antología con la *Isagoge* de Johannitius, los *Aphorismi* y los *Pronostica* de Hipócrates y, andando el tiempo, la *Tegni* de Galeno. Otras fuentes importantes fueron el *Circa instans,* el *Passionarius* de Garioponto y el *Opus agriculturae* de Paladio. Alejandro de Tralles, médico bizantino nacido en Efeso en el 523, constituye, con su *Terapéutica*, la autoridad privilegiada: 64 de los 120 lemas provienen de su *Terapéutica*. Le sigue Oribasio, pergameo de origen y médico del emperador Juliano el Apóstata.

Un precedente inmediato del *Alphita* fueron los *synonyma*, colecciones de términos médicos árabo-latinos. Gozaron de notable difusión los *Synonyma Rasis*, una lista de términos técnicos árabes con su traducción latina, extraídos de los escritos médicos de Razes y los *Synonyma Stephani*, de Esteban de Antioquía, un salernitano del siglo XII que vivió en Oriente. Con posterioridad a nuestro glosario, y basadas en él, se escribirán los *Synonyma medicinae sive Clavis sanationis* de Simón de Génova (médico del papa Nicolás IV, 1288-1292), las *Pandectae medicinae* u *Opus pandectarum medicinae* de Matteo Silvatico (dedicado a Roberto, rey de Sicilia, 1316-1334) y los *Synonyma Bartholomei*, compilado hacia finales del siglo XIV. Una obra clave en la creación del léxico médico-botánico en español en época medieval, la *Sinónima de los nombres de las medicinas griegos e latinos e arábigos*, constituye una traducción-refundición del *Alphita*.

Las imágenes que aparecen en los tratados medievales sobre medicina, farmacia e historia natural pueden sorprendernos. No responden al canon de la ilustración que hemos interiorizado: ni guardan parecido a veces con los objetos a los que remiten, ni resulta inmediata su utilidad real en el ejercicio de la medicina o en la docencia. A veces imágenes y textos han recorrido caminos distintos. Otras, una misma imagen acompaña textos distintos. Las imágenes prevalecen a menudo sobre los textos, como cuando se habla de cauterizaciones, donde la explicación queda inscrita en el dibujo. Se trata, no obstante, de unas creaciones ricas en su plasticidad, hermosas y precisas. ¿Cómo y cuándo empezó en Europa el impulso por observar y dibujar la naturaleza? ¿En qué medida posibilitó el conocimiento empírico y en qué medida procedía de él? Desde finales del siglo XIII, los círculos académicos convirtieron en rutina la ilustración con imágenes de las iniciales de los escritos médicos. En ese caso, la inicial historiada resulta pertinente para el texto, si no constituye una presentación pictográfica del tema.

Por su importancia única en la evolución del saber destacan las imágenes relativas a voces del *De materia medica*, de Dioscórides. En su forma original, *De materia medica* constituía una enciclopedia, formada por cinco libros, sobre las sustancias de los tres reinos de la naturaleza (plantas, minerales y animales), según se presentan en la cuenca mediterránea. Cada capítulo, consagrado a un fármaco, comprende su descripción, preparación medicamentosa, propiedades terapéuticas y aplicaciones. En el transcurso del tiempo, la obra experimentó numerosas modificaciones y adaptaciones, se extractaron los capítulos útiles sobre sustancias vegetales y se reordenaron por orden alfabético de los nombres de las plantas. A ese texto alfabético y abreviado se le denomina el *herbario de Dioscórides*, cuyo códice más famoso es el manuscrito *medicus graecus I*, uno de los tesoros de la Biblioteca Nacional de Austria en Viena, conocido por *Dioscorides Vindobonensis*. El Dioscórides de Viena data del año 513. Su influencia en la ilustración medieval resultó determinante.

Empezamos a barruntar con precisión su alcance. Por ejemplo, matizando la agresividad de la llamada *devastatio constantinopolitana*, cuando en 1204 las fuerzas occidentales de la Cuarta Cruzada asediaron Constantinopla, capital del imperio bizantino cuyo dominio mantuvieron hasta 1261. Lo que se consideraba epítome de la barbarie europea, lo cuestiona un documento que había escapado de la atención hasta ahora y revela el interés de los latinos por los libros bizantinos y su cultura científica. Un herbario ilustrado con texto en francés y en latín escrito probablemente en las postrimerías del siglo XIII o comienzos del siglo XIV reproduce un número extenso de ilustraciones tomadas de manuscritos bizantinos. El códice, con 256 ilustraciones coloreadas de plantas, se conserva en la Biblioteca Real de Copenhague (MS Thott 190). Las fuentes de más de dos tercios de las representaciones vegetales son dos copias bizantinas de la *De materia medica* de Dioscórides. Esas copias se encontraban en Constantinopla durante el asedio.

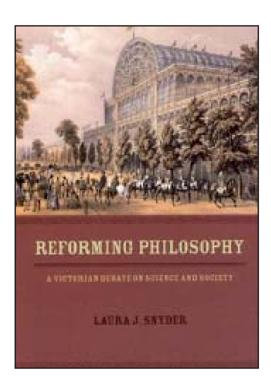
Hacia finales del siglo XIII, un estudioso salernitano compiló un resumen puesto al día del conocimiento sobre herbarios, el *Tractatus de herbis et plantis*. Incluía unas 400 ilustraciones y se construyó sobre otra obra salernitana, el *Circa instans* de Matthaeus Platearius. Amén de la innovación de las imágenes, el compilador del *Tractatus* expandía el texto del *Circa instans* y aportaba información tomada prestada del *Herbarius* del Pseudoapuleyo, de Dioscórides, Macer Floridus, Constantino el Africano y otros. Por su lado, los textos quirúrgicos suelen ir acompañados de ilustraciones abundantes. El ejemplo más ambicioso nos lo ofrece John de Arderne, quien en una serie de 250 ilustraciones marginales aprovecha el potencial de tal material representativo para extender el poder de las palabras. Emplea la frase *sicut hinc depingitur* ("como aquí se ilustra"). La anatomía podía enseñarse a partir de las ilustraciones en ausencia de cadáveres. Al menos eso es lo que declaraban los cirujanos. Henri de Mondeville empleaba ilustraciones a toda página para sus clases de anatomía en París en 1306. Encontramos también ilustraciones en los libros dedicados a los baños (*De balneis Puteolanis*) y los *Regimina sanitatis*.

Que las traducciones ejercieron una función vehicular es un truismo. Traemos a colación la obra médica principal de un representante eximio. Moshe ben Maimon (1135-1204), Maimónides. Rabí, filósofo y médico a partes iguales. Nacido y formado en Córdoba, abandonó la ciudad tras su conquista por los almohades en 1148. Tras errar por muchos países, se asentó en Egipto. Su escrito *Sobre el asma* constituye en realidad un genuino régimen de salud. Siguiendo el precepto de Galeno, declara que un estilo de vida sano previene las enfermedades crónicas, asma incluida. Aconseja que el paciente preste atención a la ingesta y describe los alimentos buenos y malos. La traducción del tratado sobre el asma se inició en Montpellier en 1294 por Armengaud Blaise, sobrino de Arnau de Vilanova.

Además de su traducción del *De asmate* y *De emorroidibus*, Armengaud tradujo el *Cantica* de Avicena con el comentario de Averroes, ex arabico in latinum; el *Quadrans* de Profachius (Jacob ben Machir), ex hebreo in latinum; la *Yconomia* del Pseudogaleno, "e arabico in latinum"; *De cognitione propriorum defectuum et viciorum*, de Galeno, de arabico in latinum; *De venenis*, de Maimónides. Armengaud vivió varios años en Gerona.

La otra traducción se atribuye a Giovanni da Capua, un médico de la corte romana a finales del siglo XIII. La versión de Giovanni y la de Armengaud Blaise difieren mucho entre sí desde el punto de vista estilístico. Los traductores pueden escoger la misma raíz latina para un mismo verbo árabe, pero emplearán de inmediato construcciones gramaticales distintas. Resulta difícil encontrar una secuencia idéntica de más de dos o tres palabras en ambas versiones. De los dos traductores, Armengaud exhibe un vocabulario más rico. Giovanni abusa del término "res" para designar algo. El deseo manifiesto de Armengaud de mostrar el sentido con la máxima transparencia podría muy bien reflejar un rasgo interesante de su traducción. Un aspecto del mundo de Maimónides que se nos revela con mayor claridad en la traducción de Armengaud es la prohibición mahometana del alcohol. Maimónides comenzó el capítulo séptimo de su *De asmate* sobre el régimen de la bebida, mostrando su aprecio por el vino. Sabía que ese régimen no se aplicaba a los musulmanes, que lo tienen prohibido. Aunque llega un momento en que corta porque dice que carece de sentido ponderar algo que no se consume.

Luis Alonso



REFORMING PHILOSOPHY. A VICTORIAN DEBATE ON SCIENCE AND SOCIETY,

por Laura J. Snyder.
University of Chicago Press; Chicago, 2006.

Filosofía

¿Entender o transformar el mundo?

Carlos Marx en la Tesis once sobre Feuerbach acusa a los filósofos de haberse limitado a describir el mundo y lanza la consigna de que ya es hora de que tomen como misión la de transformarlo. En el fondo, recoge la idea común que explicitan los filósofos del siglo XIX. En concreto, tanto William Whewell como John Stuart Mill consideran que su misión es transformar el mundo. Radical, Mill escribe en su *Autobiografía* que después de leer a Bentham en 1821 consideró que el objeto de su vida era "ser un reformador del mundo". En paralelo, Whewell hace parecida afirmación en carta a James Rose. Pero tanto Whewell como Mill observan que las transformaciones sociales y económicas dependen, básicamente, de los progresos de la ciencia y la técnica, de sus aplicaciones y desarrollos industriales y comerciales. Se les hace necesario, por ello, y como paso primero para alcanzar su objetivo reformador final, analizar tanto la metodología como las repercusiones epistemológicas de la praxis científica. Desde este análisis, el salto a la economía política, a la modificación de los comportamientos sociales

y morales, a las reformas de la filosofía y del mundo.

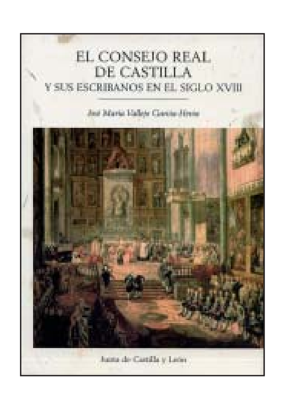
Laura Snyder estudia en este libro, con plena lucidez, el debate sobre ciencia y sociedad que mantuvieron de modo implícito y, en ocasiones, explícito, Whewell y Mill a lo largo del siglo xix, un debate no estrictamente académico, sino básicamente político. En él se adoptan dos posiciones desde la perspectiva actual. Una línea que mantiene el orden establecido y que puede atribuirse a Whewell y una más radical como propia de Mill con su defensa de la libertad de matrimonio para las mujeres al igual que el derecho al sufragio de las mismas, la defensa de los animales, la lucha contra la esclavitud, sus proclamas en defensa del liberalismo... Dos posiciones condicionadas por las discusiones acerca de si en la praxis científica hay o no elementos apriorísticos o se apoya, por modo exclusivo, en el empirismo. Este último conlleva la plasmación de los cánones de la práctica científica o cánones de Mill que puedan trasvasarse al estudio de la moral, la economía y la política.

El libro de Snyder trata de ilustrar un enfoque metodológico de aproximación a la historia del pensamiento, de la historia de la ciencia en el cual se intenta captar todos los intereses subyacentes de los principales pensadores-actores de un momento dado. Sólo conociendo el contacto inicial de Whewell con los trabajos de mineralogía de Mohs se puede comprender, según la autora, el posterior intento de Whewell de enlazar intuicionismo y apriorismo. Del mismo modo, sólo tratando de comprender el interés político de Mill se puede entender la visión que desarrolla de la ciencia, visión elaborada por motivos más políticos que por intereses epistemológicos. Y, por supuesto, desde esta visión, clarificar el debate entre los dos más grandes pensadores de Gran Bretaña del siglo xix sobre las tesis del descubrimiento y la confirmación de las teorías científicas permite justificar sus concepciones sobre moral y política.

Un enfoque metodológico muy sugestivo, ciertamente, pero que llega a marginar hasta cierto punto las contribuciones en el pensamiento de la filosofía de la ciencia de ambos pensadores al igual que el papel de otros que se quedan como secundarios en un siglo que la autora califica con toda certeza como el de la "era de la reforma".

La obra se completa con una extensa bibliografía y un muy cuidado índice, así como ocho figuras con los retratos de los dos protagonistas principales. Un libro sugerente, muy útil para completar el estudio concreto de las obras tanto de Whewell como del padre de la Economía Política y del liberalismo, Stuart Mill.

Javier de Lorenzo



EL CONSEJO REAL DE CASTILLA Y SUS ESCRIBANOS EN EL SIGLO XVIII,
por José M.ª Vallejo García Hevia.
Junta de Castilla-León, 2007.

Consejo de Castilla

Antonio Martínez Salazar y Pedro Escolano de Arrieta

Un libro francamente extenso, primorosamente editado, con ilustraciones de alta calidad, dotado de citas previas, prefacio, presentación e introducción, más un postfacio con colofón y dos índices, anuncia una obra extraordinaria. Y no cabe duda de que lo es. Que su contenido y asimilación dependa de la cultura y de la preparación específica del lector es cosa distinta, por razón de su alta especialización. José María Vallejo es hoy catedrático de Historia del Derecho en la Universidad de Castilla-La Mancha. Y en esta obra de investigación aborda pormenorizadamente un aspecto de lo prometido en el título. No se trata de una historia del Consejo Real de Castilla, ni siquiera de sus escribanos de Cámara, sino de la vida de dos de los titulares de esa escribanía, y de su obra: Antonio Martínez Salazar y Pedro Escolano de Arrieta, ambos del siglo xviii.

Haber escogido la centuria dieciochesca puede parecer extraño si pensamos que la época de oro de los Consejos se localiza en los siglos xvi y xvii, pero resulta en verdad un acierto si tenemos en cuenta que el Consejo de Castilla, a diferencia de los demás, no quedó disminuido en el siglo de los Borbones con la aparición de los ministerios, sino que —tal vez por la inexistencia de un ministerio del Interior—, no sólo aumentó sus competencias, sino que contribuyó a la administración de toda España. En este sentido, la elección del xviii como encuadre cronológico resulta un acierto. Como respuesta anticipada a quienes pudieran alegar que el estudio se limita sólo a dos escribanos de cámara, el autor expresa pronto su opinión: "no creo que ninguna vida humana sea menuda, rutinaria, carente de interés" (pág. 87). Ciertamente, todo lo referente a un ser humano nos interesa, aunque en distinto grado. Tal vez el libro carecería de capacidad de enriquecimiento para muchos lectores si el autor no realizase numerosas excursiones que nos permiten conocer el funcionamiento de los Consejos y sus escribanías, así como del espíritu que en el siglo xviii les animaba. Aquellos funcionarios ilustrados eran ordenados, puntuales, metódicos, detallistas, aunque no se les podía exigir prisa.

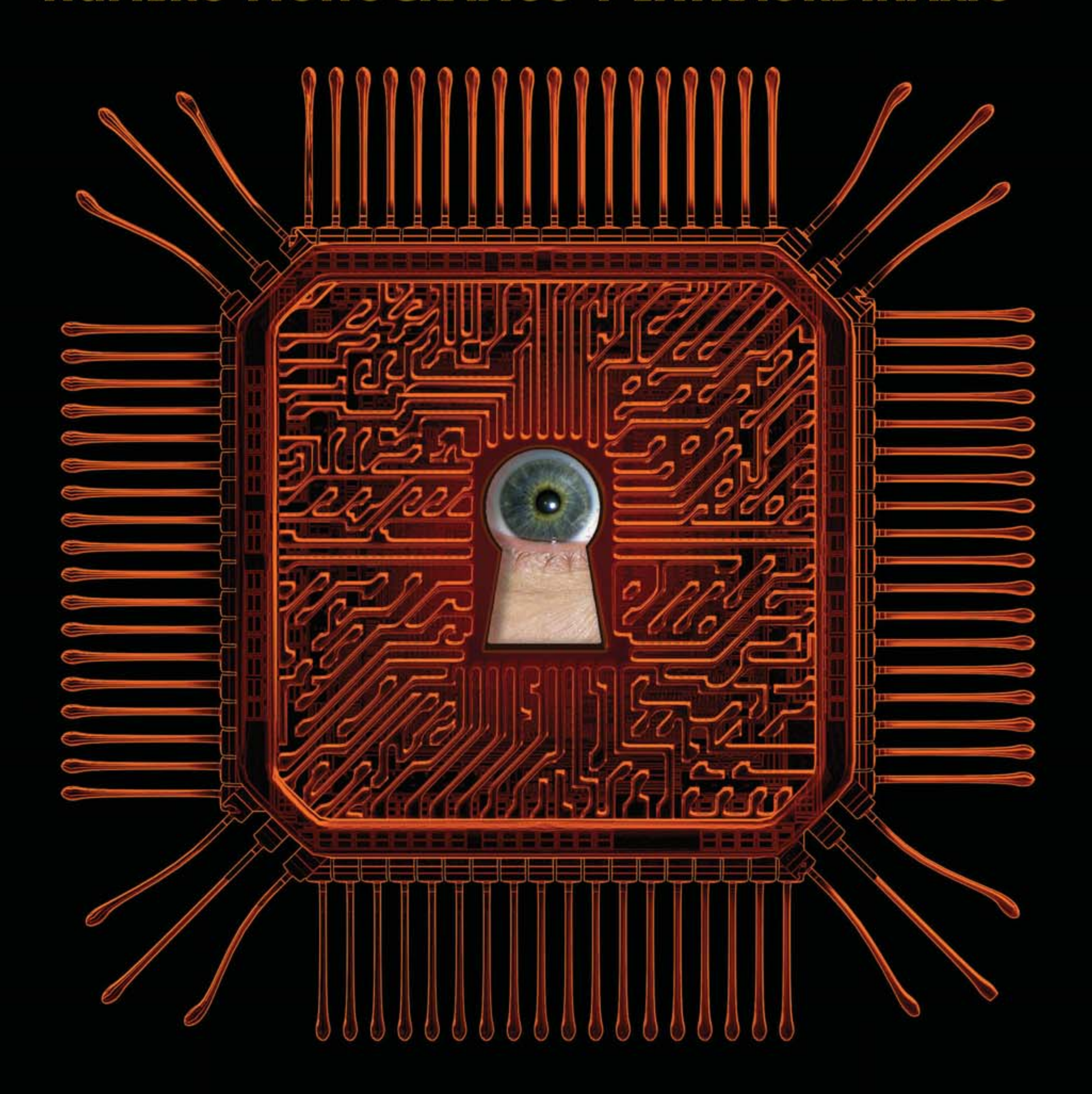
Por supuesto, muchos de los numerosísimos detalles de la vida de los dos escribanos, incluyendo su extensa parentela en varias generaciones, pueden parecer a muchas personas no especialistas excesivamente frondosos. Más útil resulta el estudio de sus obras respectivas: *Colección de memorias y noticias del Consejo* (1764) de Martínez de Salazar, y *Práctica del Consejo Real* (1796, obra póstuma) de Pedro Escolano, que nos permiten, por así decirlo, penetrar en el interior de una escribanía y su método de trabajo. La obra, en su conjunto, puede producir la sensación de algo desmesurado por su método de tratamiento y sus *excursus*. A más de uno puede extrañar la inclusión de un extenso texto sacado de la conocida —pero muy ajena al tema— obra de Stephen Hawking *Historia del Tiempo* (pág. 543). Por otra parte, está claro que a la obra de José María Vallejo no se puede pedir más en capacidad de erudición, riqueza de información documental y bibliográfica (unas 1500 notas a pie de página) y abundancia de ilustraciones muy detalladamente explicadas.

José Luis Comellas

EN EL PROXIMO MES DE NOVIEMBRE

PRIVACIDAD

NUMERO MONOGRAFICO Y EXTRAORDINARIO



Privacidad en tiempos de terrorismo y teraoctetos

Instrumentos para el espionaje

Identificación por radiofrecuencia

Privacidad genética

Mas allá de la dactiloscopia

Protección de datos

Identidad en la Red